

الحاصل على جائزة نوبل في الفيزياء 2017

الطبعة
2

كيب ثورن الثقوب السوداء وتمدد الزمن



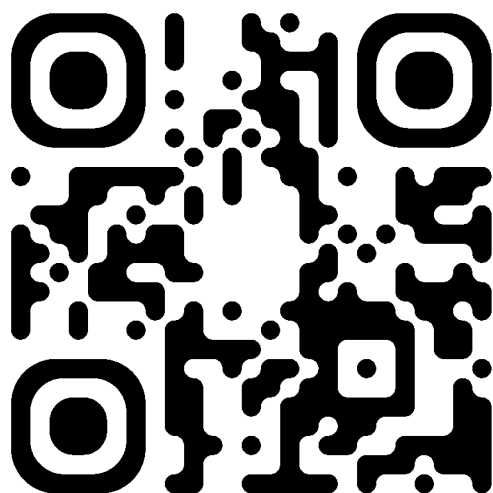
ميراث أينشتاين البغيض



تقديم: ستيفن هوكينج



ترجمة: مصطفى العدوي



سجل في مكتبة

اضغط الصفحة

SCAN QR

الثقوب السوداء

وتمدد الزمن

كيب ثورن

♦ المؤلف، كيب ثورن

♦ العنوان، الثقب السوداء وتمدد الزمن - ميراث أينشتاين البغيض

♦ ترجمة، مصطفى العدوي - تقديم ستيفن هوكينج

♦ الطبعة، الأولى 2024

♦ تصميم الغلاف، عمرو الكفراوي

♦ مستشار النشر، سوسن بشير

♦ المدير العام، مصطفى الشيخ



رقم الإيداع:

٢٠٢٣ / ٢٠٣٢٨

الترقيم الدولي: ISBN

978 - 977-765 - 407 - 4

مكتبة
t.me/soramnqraa

Afaq for Publishing & Distribution

17 Mahmoud Basiony St, 6th floor, from Tallat Harb Sq, Cairo – Egypt

Tel: 00202 25778743 - 00202 25779803 Mobile: +202-01111602787

E-mail: afaqbooks@yahoo.com

١٧ شارع محمود بسيوني - الدور السادس - متفرع من ميدان طلعت حرب - القاهرة - جمهورية مصر العربية

ت: ٢٥٧٧٨٧٤٣ ٠٠٢٠٢ - ٢٥٧٧٩٨٠٣ ٠٠٢٠٢ - موبايل: ٠١١١١٦٠٢٧٨٧

f afaqcairo @ afaqcairo ☒ afaqcairoplsh

كيب ثورن

الثقوب السوداء وتمدد الزمن

ميراث أينشتاين البغيض

تقديم

ستيفن هوكينج

ترجمة

مصطفى العدوي

آفاق للنشر والتوزيع

هذه ترجمة كتاب:

BLACK HOLES AND TIME WARPS

By Kip S. Thorne

© 1994 by Kip S. Thorne. Published by agreement with Harold Ober Associates

جميع الحقوق محفوظة

© آفاق للنشر والتوزيع

All rights reserved

© Afaq for Publishing & Distribution 2023

مكتبة
t.me/soramnqraa

أهدي هذا الكتاب إلى جون أرثشيبالد ويلر،
معلمي وصديقي.

المحتويات

11	تقديم وشكر وإهداء قصير غير بغيض من المترجم
13	تقديم: ستيفن هو كينج
15	تمهيد: فريدريك ستيز
19	استهلال
23	المقدمة: رحلة بين الثقوب
23	الجحيم
30	تدوين الأسس للأعداد الكبيرة والصغيرة
39	القوس
43	جار جانتوا
51	الوطن
64	الفصل الأول: نسبة المكان والزمن
66	المكان والزمن المطلقان لنيوتن، والأثير
79	المكان والزمن النسبيان لأينشتاين، والسرعة المطلقة للضوء
85	برهان أينشتاين على مزج المكان والزمن
94	طبيعة القانون الفيزيائي
98	الفصل الثاني: اعوجاج المكان والزمن
98	الزمكان المطلق لمينكوفسكي
102	صيغة مينكوفسكي
106	قانون نيوتن للجاذبية، وخطوات أينشتاين الأولى لتزويجها بالنسبية
107	انزياح الحضيض الشمسي لعطارد
114	انزياح دوبلر
115	تمدد الزمن بفعل الجاذبية

117	قوى المد والجزر بفعل الجاذبية وانحناء الزمكان
120	المد والجزر في المحيطات اللذان تنتجهما قوى المد والجزر
134	معادلة أينشتاين للمجال: قانون أينشتاين لاعوجاج الزمكان
138	الفصل الثالث: الثقوب السوداء، الاكتشاف ثم الرفض
160	الفصل الرابع: لغز القزم الأبيض
161	الميكانيكا الكمومية وأمعاء الأقزام البيضاء
167	تاريخ موجز لازدواجية الموجة/الجسيم
170	الكتلة القصوى
177	شرح لكتلة النجوم القزمة البيضاء ومحيطها
179	المعركة
187	الفصل الخامس: الانفجار الداخلي إجباري
187	زفيكي
193	الهياكل الداخلية للذرات
197	تبادل الكتلة والطاقة
204	لاندאו
209	الحرق النووي (الاندماج) الذي يتناقض مع الحرق العادي
213	أوبنهايمر
220	حكاية أوبنهايمر وفولكوف وتولمان: البحث عن كتل النجوم النيوترونية
225	ويلر
228	معادلة هاريسون-ويلر لحالة المادة الباردة الميتة
233	سكنى غير مستقرة في الفجوة بين الأقزام البيضاء والنجوم النيوترونية
240	الفصل السادس: الانفجار الداخلي، إلى أين؟
242	ولادة الثقب الأسود: لمحة أولى
252	فاصل نووي
253	الاندماج والانشطار والتفاعلات المتسلسلة
266	لماذا صنع الفيزيائيون السوفييت القنبلة لستالين؟
269	ولادة الثقب الأسود: فهم أعمق

294	الفصل السابع: العصر الذهبي
297	المرشدون: ويلر، زيلدوفيش، سياما
309	الثقوب السوداء ليس لها شعر
313	شرح طرق التقلب للقراء الذين يحبون الجبر
323	الثقوب السوداء تدور وتنبض
324	منظمة العلوم السوفيتية والغربية: التناقضات والعواقب
339	الفصل الثامن: البحث
339	الطريقة
349	البحث
364	الفصل التاسع: الصدفة
364	المجرات الراديوية
377	النجوم الزائفة
390	الثقوب السوداء فائقة الضخامة
402	الفصل العاشر: تموجات الانحناءات
402	السيمفونيات
407	اللا خطية وعواقبها
411	القضبان
419	مبدأ عدم اليقين وازدواجية الموجة/ الجسيم
426	مرصد موجات الجاذبية باستخدام التداخل الليزري
432	التداخل وقياس التداخل
447	الفصل الحادي عشر: ما الواقع؟
448	حد الكمال للمساطر (المقياس) ولل ساعات
462	الفصل الثاني عشر: تبخر الثقوب السوداء
462	نمو الثقوب السوداء
465	الأفق المطلق والظاهري لثقب أسود حديث الولادة
468	تطور الأفق الظاهري والمطلق للثقب التراكمي
473	القصور الحراري/ الإنتروپيا

475	القصور الحراري في غرفة ألعاب الطفل
479	إشعاع الثقوب السوداء
483	تقلبات الفراغ
488	الثقوب السوداء تنكمش وتنفجر
496	الإشعاع التراكمي
503	الفصل الثالث عشر: داخل الثقوب السوداء
503	المفردات والأكوان الأخرى
514	ثورة بنروز
529	أفضل التخمينات
541	الفصل الرابع عشر: الثقوب الدودية وآلات الزمن
541	الثقوب الدودية والمواد الغريبة
547	الإبقاء على الثقب الدودي مفتوحًا: مادة غريبة
557	آلات الزمن
568	مفارقة قتل الأم
573	أزمة كرة البلياردو: لا نهاية للمسارات
576	حماية التسلسل الزمني
584	الخاتمة
586	في نهاية نوفمبر 1993
589	شكر وتقدير
591	الشخصيات
600	التسلسل الزمني
611	قاموس المصطلحات العلمية
630	الملاحظات: ما الذي يجعلني متأكدًا مما كتبت؟
663	قائمة المراجع

تقديم وشكر واهداء قصير غير بغيض من المترجم

لا أود أن أطيل على القارئ ونحن في حضرة العظماء، كتاب عن إرث أينشتاين قدّم له ستيفن هوكينج وكتبه كيب ثورن، لكنني في عجلة سأحدث عن حدث عابر، إذ في عرض دعائي لفيلم Interstellar لفت انتباهي رجل وقور يتحدث بصفته المنظر والمراجع العلمي لهذا الفيلم.

من هذا الرجل؟

عرفت أنه كيب ثورن.

ومن هو كيب ثورن؟

الحقيقة أنت الإجابة بعد أشهر قليلة بفوز كيب ثورن بجائزة نوبل في الفيزياء. شرّفتني دار آفاق للنشر والتوزيع ومنحتني -أمتن لهم كثيرًا على هذا الشرف- الفرصة لكي أقابل هذا الرجل في الكتاب الذي يُعرف على أنه أحد أهم كتب الفيزياء الفلكية.

والحقيقة أنه رغم صدور نسخته في التسعينيات، فإنه حمل الكثير من النبوءات التي تحقق معظمها في الأعوام التالية.

لقد شرح كل أساس علمي للمفيزات الحالية التي حدثت مؤخرًا في علم الفلك. ولقد لاحظت أن كيب ثورن يفكر ونولان يخرج. فهنا شاهدت طيفًا لفيلم Interstellar وتعلمت المزيد من الخبايا عن أوبنهايمر، وأدركت أثرًا لهوس نولان بالزمن.

أما كيف، ففي متن الكتاب تسكن الإجابات.

أكرر شكري لدار آفاق وفريقها وعلى رأسها الأستاذ فائق الاحترام مصطفى الشيخ.

وأشكر زوجتي د. إيمان الرفاعي على وقتنا الذي سلبته منها في سبيل إتمام مهمة العمل على هذا الكتاب.

وأخيرًا، أهدي هذا العمل مترجمًا لطفلينا - وإن كنت قد نسيت سبب الإهداء. والله من وراء القصد.

المترجم: مصطفى العدوي

2023 / 12 / 18

تقديم

يدور هذا الكتاب حول ثورة طرأت في منظورنا للمكان والزمن ثم ما تلا ذلك من تبعات رائعة، والتي لم يُكشف النقاب عن بعضها حتى الآن. إنها حكاية رائعة، كتبها شخص شارك عن كُتب في النضالات والنجاح النهائي في البحث عن فهم لما قد يكون أعقد الأحجيات في الكون - الثقوب السوداء.

لقد اعتاد المرء على الاعتقاد بأن سطح الكرة الأرضية مسطح، فهو إما ممتد إلى الأبد وإما أن له بعض الحواف التي قد تسقط منها إذا كنت متهورًا بما يكفي للسفر بعيدًا. ثم كانت العودة الآمنة لما جلان وكل أولئك البحارة حول العالم، والتي أقنعت الناس أخيرًا بأن سطح الأرض منحنٍ ومنغلق على نفسه في شكل كرة، ولكن لا يزال يُعتقد أنه من البديهي أن هذه الكرة موجودة في مكان مسطح، بمعنى الالتزام بقواعد هندسة إقليدس: الخطوط المتوازية لا تلتقي أبدًا. ومع ذلك، في عام 1915، طرح أينشتاين نظرية تجمع بين المكان والزمن وأطلق عليها ما نعرفه الآن «بالزمكان». لم يعد هذا الزمكان مسطحًا، ولكنه منحنٍ أو معوج بسبب المادة والطاقة الموجودتين فيه. نظرًا لأن الزمكان مسطح تقريبًا في منطقتنا - من هذا الكون، فإن هذا الانحناء لا يحدث فرقًا كبيرًا في المواقف العادية (تكاد لا تلاحظ). لكن الآثار المترتبة على امتدادات الكون البعيدة أكثر إثارة للدهشة حتى مما تصوره أينشتاين. أحد هذه الاحتمالات هو احتمال انهيار النجوم تحت تأثير جاذبيتها، حتى يصبح الفضاء / (المكان) المحيط بها منحنياً للغاية، لدرجة أنها تنقطع عن بقية الكون. حتى أينشتاين نفسه لم يكن مقتنعًا أن مثل هذا الانهيار يمكن أن يحدث على الإطلاق، لكن عددًا من الأشخاص الآخرين أظهروا أنه نتيجة حتمية لنظريته.

إن قصة كيفية قيامهم بذلك، وكيف اكتشفوا الخصائص المميزة للثقوب السوداء التي خلّفها انهيار النجوم في الفضاء، هي موضوع هذا الكتاب.

إنه تاريخ من الاكتشافات العلمية قيد الإنشاء، كتبه أحد المشاركين، مثل كتاب «اللولب المزدوج *The Double Helix*» لجيمس واتسون حول اكتشاف بنية الحمض

النووي، مما أدى إلى فهم الشفرة الوراثية. ولكن على عكس حالة الحمض النووي، لم ترشد الباحثين أيُّ نتائج تجريبية. وبدلاً من ذلك، تطورت نظرية الثقوب السوداء قبل أن يكون هناك أي مؤشر من بيانات الرصد والمراقبة على وجودها بالفعل. لا تلهمني معرفتي بأي مثال مشابه في العلوم حيث نُفِّذ مثل هذا الاستقراء العظيم بنجاح على أساس الأفكار العلمية النظرية فقط. وهو ما يُظهر القوة والعمق الرائعين لنظرية أينشتاين.

لا يزال هناك الكثير مما لا نعرفه، مثل ما يحدث للأشياء والمعلومات التي تسقط في الثقب الأسود. هل تعاود الظهور في مكان آخر من هذا الكون أم في كون آخر؟ وهل يمكننا عوج المكان والزمن لدرجة تمكّن المرء من العودة بالزمن إلى الوراء (السفر إلى الماضي)؟ هذه الأسئلة هي جزء من سعيينا المستمر لفهم الكون. ومن يدري؟! ربما يعود شخص ما من المستقبل ويخبرنا بالإجابات.

STEPHEN HAWKING

ستيفن هوكينج

تمهيد

يعتمد هذا الكتاب على مزج بين المبادئ الفيزيائية الصارمة والتأملات المغرقة في الخيال، والتي يهدف المؤلف من خلالها للوصول إلى ما هو أبعد من المعارف الراسخة في الوقت الحاضر، وإسقاطه على جزء من العالم الفيزيائي ليس له نظير معروف في حياتنا اليومية على كوكب الأرض. هدفه هو، من بين أمور أخرى، فحص كلٍّ من الأجزاء الخارجية والداخلية للثقب الأسود، وهو جسم نجمي ضخم جدًا ومركّز لدرجة أن مجال جاذبيته يمنع جزيئات المادة والضوء من الهروب بطرق شائعة في نجم مثل نجمنا الشمس. إن الأوصاف المقدمة للأحداث التي يمكن أن تحدث إذا اقترب المراقب/ (الراصد) من مثل هذا الثقب الأسود من الخارج، تعتمد على تنبؤات النظرية النسبية العامة في عالم «الجاذبية القوية»، والتي لم تختبر بعد. والتكهنات التي تتجاوز ذلك وتتعامل مع منطقة داخل ما يسمى «أفق» الثقب الأسود مبنية على شكل خاص من الشجاعة -بل الجسارة- التي يتمتع بها ثورن وشركاؤه الباحثون من كل أنحاء العالم، والتي ينشرونها ويتبادلونها بكثير من السعادة والمتعة. ويتذكّر المرء المقولة الساخرة التي قالها أحد علماء الفيزياء البارزين: «عادةً ما يكون علماء الكونيات مخطئين، ولكن نادرًا ما يكون لديهم شك في ذلك».

لذا ينبغي على المرء أن يقرأ هذا الكتاب لهدفين: تعلم بعض الحقائق الصعبة فيما يتعلق بالسمات الغريبة ولكن الحقيقية لكوننا المادي، والاستمتاع بالتنبؤات المستنيرة حول ما قد يكمن وراء ما نعرفه بيقين عقلائي.

كمقدمة لهذا العمل، ينبغي القول إن نظرية النسبية العامة لأينشتاين، وهي واحدة من أعظم إبداعات العلم التأملي، كانت قد صيغت منذ قرن من الزمن. وأحرزت انتصارًا كبيرًا في العشرينيات من القرن الماضي، من خلال تقديم تفسير لانحرافات حركة كوكب عطارد تتفوق على تنبؤات نظرية نيوتن للجاذبية، ثم كان الانتصار التالي في تفسير الانزياح نحو اللون الأحمر للسُدُم البعيدة التي اكتشفها هابل وزملاؤه في مرصد جبل ويلسون، تلا ذلك فترة من الهدوء النسبي، تحول خلالها الكثير من اهتمام مجتمع علماء الفيزياء إلى

استغلال الميكانيكا الكمومية ومعها الفيزياء النووية وفيزياء الجسيمات عالية الطاقة، ثم التقدم الذي طرأ على علم الرصد الفلكي.

اقترح مفهوم الثقوب السوداء بطريقة تأملية بعد وقت قصير من اكتشاف نظرية نيوتن في الجاذبية. ومع التعديلات المناسبة، وُجد أن لها مكاناً طبيعياً في النظرية النسبية إذا كان المرء على استعداد لاستقراء حلول المعادلات الأساسية لمثل هذه المجالات ذات الجاذبية القوية - وهو الإجراء الذي نظر إليه أينشتاين بتشكك في ذلك الوقت. ومع ذلك، باستخدام النظرية، أشار تشاندراسخار في عام 1930 إلى أنه وفقاً للنسبية، فإن النجوم التي تتمتع بكتلة أعلى من القيمة الحرجة - أو ما يسمى بحد تشاندراسخار - يجب أن تنهار عندما تستنفد مصادر الطاقة النووية المسؤولة عن ارتفاع درجة حرارتها لتصبح ما نسميه الآن الثقوب السوداء. في وقت لاحق إلى حد ما، في ثلاثينيات القرن العشرين، توسع هذا العمل من قبل زفيكي وأوبنهايمر وزملائه، الذين أثبتوا أن هناك نطاقاً من الكتلة النجمية حيث يمكن للمرء أن يتوقع انهيار النجم إلى حالة من النيوترونات الكثيفة بدلاً من الثقوب السوداء، أو ما يسمى بالنجم النيوتروني. في كلتا الحالتين، فإن الانفجار الداخلي الأخير للنجم عند استنفاد طاقته النووية يجب أن يكون مصحوباً بتدفق هائل من الطاقة في وقت قصير نسبياً، وهو تدفق يرتبط بتألق المستعرات العظمى التي تُرى أحياناً في مجرتنا أيضاً. كما هي الحال في السُّدُم البعيدة.

أوقفت الحرب العالمية الثانية مثل هذا العمل. ومع ذلك، في الخمسينيات والستينيات من القرن الماضي، عاد المجتمع العلمي إليه باهتمام متجدد وقوة على الصعيدين التجريبي والنظري. أُحرزت ثلاثة نجاحات كبيرة. أولاً، وجدت المعرفة المكتسبة من الأبحاث في مجال الفيزياء النووية وفيزياء الطاقة العالية مكاناً طبيعياً في النظرية الكونية، حيث قدمت الدعم لما يسمى عادة بنظرية «الانفجار الأعظم» حول تكوين كوننا. تدعم العديد من الأدلة الآن وجهة النظر القائلة بأن كوننا كما نعرفه نشأ نتيجة للتوسع من حساء بدائي صغير من الجسيمات الساخنة والمكتظة بكثافة، والتي تسمى عادة بالكرة النارية. بدأ هذا الحدث الأساسي في وقت ما بين عشرة وعشرين مليار سنة مضت. وربما كان الدعم الدرامي لهذه الفرضية هو اكتشاف البقايا المتدهورة للموجات الضوئية التي رافقت مرحلة متأخرة من الانفجار البدائي.

ثانياً، النجوم النيوترونية التي تنبأ بها زفيكي وفريق أوبنهايمر رُصدت بالفعل وتصرفت

وفقًا لما تنبأت به النظرية، مما أعطى مصداقية كاملة لمفهوم أن المستعرات العظمى مرتبطة بالنجوم التي خضعت لما يمكن أن يسمى انهيار الجاذبية النهائي. إذا أمكن وجود نجوم نيوترونية في نطاق معين من الكتلة النجمية، فمن المعقول جدًا استنتاج أن الثقوب السوداء ستنتجها نجوم أكبر ضخامة، مع افتراض أن الكثير من الأدلة الرصدية ستكون غير مباشرة. وفي الواقع، هناك الكثير من هذه الأدلة غير المباشرة في الوقت الحاضر.

أخيرًا، قدمت عدة أدلة دعمًا إضافيًا لصحة النظرية النسبية العامة. وهي تشمل قياسات عالية الدقة للمركبات الفضائية ومدارات الكواكب في نظامنا الشمسي، وملاحظات عن تأثير «العدسة» لبعض المجرات على الضوء الذي يصل إلينا من مصادر خارج تلك المجرات. ثم، في الآونة الأخيرة، هناك أدلة جيدة على فقدان طاقة الحركة للنجوم الثنائية الضخمة التي تدور بشكل تبادلي نتيجة لتوليد موجات الجاذبية، وهو التنبؤ الرئيسي للنظرية. تمنح مثل هذه الملاحظات الشجاعة لتصديق التنبؤات غير المختبرة للنظرية النسبية العامة على مقربة من ثقب أسود، وتفتح الطريق لمزيد من التأملات الخيالية من النوع المذكور هنا.

منذ عدة سنوات، قرر صندوق الكومنولث، بناء على اقتراح من رئيسه مارجريت ماهوني، رعاية برنامج كتاب تدعو فيه العلماء العاملين المتميزين للكتابة عن أعمالهم لجمهور من عامة المتعلمين. البروفيسور ثورن هو عالم من هذا النوع، ويسر برنامج الكتاب أن يقدم كتابه في إصداره التاسع.

تألفت اللجنة الاستشارية لبرنامج كتاب صندوق الكومنولث، التي أوصت برعاية هذا الكتاب، من الأعضاء التاليين:

لويس توماس: M.D, director

الأكسندر ج. بيرن: M.D, deputy director

لين مارجوليس: Ph.D.

ماكليين مكارثي: M.D.

لادي ميدوار

بيرتون روشيه

فريدريك سيتز: Ph.D.

مكتبة

t.me/soramnqraa

أوتو فايسنفال: M.D

ويمثل الناشر إدوين باربر، نائب رئيس مجلس الإدارة والمحرر في شركة W. W.

Norton & Company, Inc.

FREDERICK SEITZ

فريدريك سيتز

استهلال

عن أي شيء يتحدث هذا الكتاب؟

وكيف تقرأه؟

لقد شاركت لمدة ثلاثين عامًا في مسعى عظيم: مسعى لفهم الإرث الذي تركه ألبرت أينشتاين للأجيال القادمة - نظريته النسبية وتوقعاتها حول الكون - واكتشاف أين وكيف تفشل النسبية وما الذي يحل محلها.

قادني هذا المسعى عبر متاهات من الأجسام الغريبة: الثقوب السوداء، والأقزام البيضاء، والنجوم النيوترونية، والمفردات، وموجات الجاذبية، والثقوب الدودية، والاعوجاج الزمني، وآلات الزمن. لقد علمتني نظرية المعرفة: ما الذي يجعل النظرية «جيدة»؟ ما المبادئ الفوقية التي تتحكم في قوانين الطبيعة؟ لماذا نعتقد، نحن الفيزيائيون، أننا نعرف الأشياء التي نعتقد أننا نعرفها، حتى عندما تكون التكنولوجيا أضعف من أن تختبر توقعاتنا؟ لقد أظهر لي هذا البحث كيف تعمل عقول العلماء، والاختلافات الهائلة بين عقل وآخر (على سبيل المثال، عقل ستيفن هوكينج وعقلي)، ولماذا يتطلب الأمر العديد من الأنواع المختلفة من العلماء، كل منهم يعمل بطريقة الخاصة، ليجسد فهمنا للكون. لقد ساعدني سعيًا - مع مئات المشاركين المنتشرين في جميع أنحاء العالم - في تقدير الطابع الدولي للعلم، والطرق المختلفة التي يُنظَّم بها المشروع العلمي في المجتمعات المختلفة، وتشابك العلم مع التيارات السياسية، وخاصة التنافس السوفييتي / الأمريكي.

هذا الكتاب هو محاولتي لمشاركة هذه الأفكار مع غير العلماء، ومع العلماء الذين يعملون في مجالات أخرى غير مجالي. إنه كتاب يضم موضوعات متشابكة يربطها خيط من التاريخ: تاريخ كفاحنا لفك رموز إرث أينشتاين، لاكتشاف تنبؤاته التي تبدو وقحة حول الثقوب السوداء، والمفردات، وموجات الجاذبية، والثقوب الدودية، والاعوجاج الزمني.

يبدأ الكتاب بافتتاحية: حكاية من الخيال العلمي تقدم للقارئ، في عجالة، مفاهيم الفيزياء والفيزياء الفلكية في الكتاب. قد يجد بعض القراء هذه الحكاية محيطة. إن المفاهيم (الثقوب السوداء وآفاقها، والثقوب الدودية، وقوى المد والجزر، والمفردات، وموجات الجاذبية) تتطاير من الرأس بسرعة كبيرة، مع القليل من التفسير. نصيحتي: فقط دعهم يطربون؛ استمتعوا بالحكاية، للحصول على انطباع تقريبي. سيُقدّم كل مفهوم مرة أخرى، بطريقة هادئة مرة أخرى، في متن الكتاب. بعد الانتهاء من قراءة نص الكتاب، ارجع إلى المقدمة وقدر الفروق العلمية الدقيقة فيها.

المتن (الفصول من الأول إلى الرابع عشر) له نكهة مختلفة تمامًا عن المقدمة. وخطه المركزي تاريخي، ومع هذا الخيط تشابك موضوعات الكتاب الأخرى. أتابع الخيط التاريخي بضع صفحات، ثم أنفزع إلى موضوع عرضي، ثم إلى موضوع آخر، ثم أعود إلى التاريخ برهة، ثم أنطلق إلى ظل آخر. هذا التفرع والانطلاق والحبكة يعرّض القارئ إلى نسج أنيق من الأفكار المترابطة من الفيزياء، والفيزياء الفلكية، وفلسفة العلوم، وعلم اجتماع العلوم، والعلوم في الساحة السياسية.

قد تكون بعض الفيزياء صعبة الفهم في بعض جوانبها. وللمساعدة، يوجد قاموس لمفاهيم الفيزياء في الجزء الخلفي من الكتاب.

العلم هو مشروع مشترك جمعي. إن الأفكار التي تشكّل رؤيتنا للكون لا تأتي من شخص واحد أو مجموعة صغيرة، بل من الجهود المشتركة للكثيرين. ولذلك، فإن هذا الكتاب يحتوي على العديد من الشخصيات. وللمساعدة القارئ على تدكّر أولئك الذين يظهرون مرات عدة، توجد قائمة وبضع كلمات عن كلّ منهم في قسم «الشخصيات» في الجزء الخلفي من الكتاب.

في البحث العلمي، كما هي الحال في الحياة، يتابع العديد من الأشخاص المختلفين العديد من المواضيع في وقت واحد؛ وقد تنبع رؤى عقد واحد من أفكار عمرها عدة عقود ولكنها أُهمِلت في السنوات الفاصلة. لفهم كل ذلك، يقفز الكتاب ذهابًا وإيابًا عبر الزمن، يعيش في الستينيات لفترة من الوقت، ثم يعود إلى الثلاثينيات، ثم يعود إلى الموضوع الرئيسي في السبعينيات. القراء الذين يشعرون بالدوار من كل هذا السفر عبر الزمن قد يجدون المساعدة في التسلسل الزمني في الجزء الخلفي من الكتاب.

إنني لا أطمح في معايير المؤرخ فيما يتعلق بالكمال أو الدقة أو الحياء. لو سعت إلى الكمال، لسقط معظم القراء على جانب الطريق من التعب، وهكذا سيصبح حالي أيضًا. وإذا كنت أسعى إلى دقة أعلى بكثير، فإن الكتاب سيكون مليئًا بالمعادلات وسيكون علميًا غير قابل للقراءة. على الرغم من أنني سعت إلى الحياء، فإنني حتمًا فشلت؛ أنا قريب جدًا من موضوع بحثي: لقد شاركت شخصيًا في تطويره منذ أوائل الستينيات وحتى الوقت الحاضر، كما شارك العديد من أصدقائي المقربين شخصيًا منذ الثلاثينيات فصاعدًا. لقد حاولت موازنة انحيازاتي في النتائج التي توصلت إليها من خلال إجراء مقابلات مسجلة موسعة مع مشاركين آخرين في المهمة (انظر قائمة المراجع)، ومن خلال تشغيل الفصول بعضها بعد بعض (انظر الشكر والتقدير). ومع ذلك، لا يزال هناك بعض التحيز بالتأكيد.

وللمساعدة القارئ الذي يريد قدرًا أكبر من الاكتمال والدقة والحياء، فقد أدرجت في الملاحظات الموجودة بالجزء الخلفي من الكتاب مصادر العديد من البيانات التاريخية للنص، والإشارات إلى بعض المقالات الفنية الأصلية التي تناولها البحث، وكتب المشاركين لشرح اكتشافات بعضهم لبعض. تحتوي الملاحظات أيضًا على مناقشات دقيقة (وبالتالي لها طابع علمي) لبعض القضايا التي شوَّهها النص بسبب سعيي إلى التبسيط.

الذكريات غير معصومة من الخطأ؛ قد يفسرها أشخاص مختلفون، مروا بنفس الأحداث، ويتذكرونها بطرق مختلفة تمامًا. لقد نقلت هذه الاختلافات إلى الملاحظات. لقد ذكرت في النص وجهة نظري النهائية للأشياء كما لو كانت إنجيلًا. ليغفر لي المؤرخون الحقيقيون، وليشكرني غير المؤرخين.

يسعد جون ويلر، قدوتي ومعلمي الرئيسي خلال سنوات تكويني كفيزيائي (والشخصية المحورية في هذا الكتاب)، بسؤال أصدقائه: «ما الشيء الوحيد الأهم الذي تعلمته عن كذا وكذا؟». بعض الأسئلة تشحذ العقل بشكل واضح. في ضوء سؤال جون، أسأل نفسي، وأنا على وشك الانتهاء من خمسة عشر عامًا من الكتابة المتقطعة (أغلبها متقطعة بصرحة): «ما الشيء الوحيد الأهم الذي تريد أن يتعلمه قراؤك؟».

جوابي: القوة المذهلة للعقل البشري - من خلال نوبات الحماس والانطلاقات، والأزقة المسدودة، وقفزات البصيرة؛ كلها من أجل كشف تعقيدات كوننا، والكشف عن البساطة المطلقة، والأناقة، والجمال المجيد للقوانين الأساسية التي تحكم هذا الكون.

المقدمة : رحلة بين الثقوب

وفيها يواجه القارئ، في إحدى قصص الخيال العلمي،

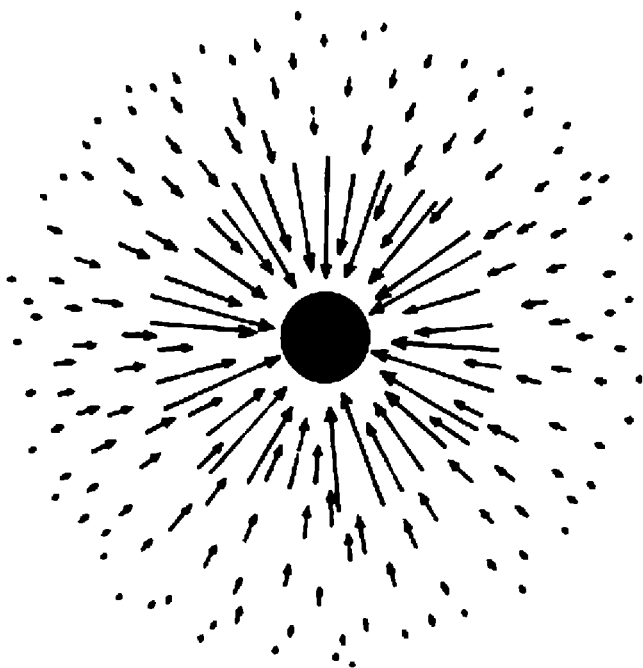
الثقوب السوداء وجميع خصائصها الغريبة

بأفضل طريقة نفهمها في تسعينيات القرن العشرين.

من بين كل المفاهيم التي يحويها العقل البشري، من وحيد القرن إلى الكرجل إلى القنبلة الهيدروجينية، ربما يكون الأروع هو الثقب الأسود: ثقب في الفضاء ذو حافة محددة يمكن أن يسقط فيه أي شيء ولا يمكن لأي شيء الهرب منه؛ ثقب ذو جاذبية قوية لدرجة أنه: حتى الضوء يلتقطه ويحتجزه في قبضته؛ ثقب يسبب انحناء الفضاء/ المكان ويشوه الزمن¹. مثل وحيد القرن والكرجل، تبدو الثقوب السوداء وكأنها تنتمي إلى عوالم الخيال العلمي والأساطير القديمة أكثر من الكون الحقيقي. ومع ذلك، فإن قوانين الفيزياء التي اختبرت جيدًا تنبأ بشكل قاطع بوجود الثقوب السوداء. في مجرتنا وحدها قد يكون هناك الملايين، لكن ظلامهم يخفيهم عن الأنظار. ويواجه علماء الفلك صعوبة كبيرة في العثور عليها².

الجحيم

تخيل نفسك مالكًا وقائدًا لمركبة فضائية عظيمة، مع أجهزة حاسوب وروبوتات وطاقم من المئات ينفذون أوامرك. لقد كلفتك الجمعية الجغرافية العالمية لاستكشاف الثقوب السوداء في المناطق البعيدة من الفضاء بين-النجوم، وإرسال وصف لكل تجاربك عبر موجات الراديو إلى الأرض. بعد ست سنوات من رحلتها، تتباطأ مركبتك الفضائية الآن في محيط الثقب الأسود الأقرب إلى الأرض، وهو ثقب يسمى «حادس»/ الجحيم بالقرب من النجم فيجا.

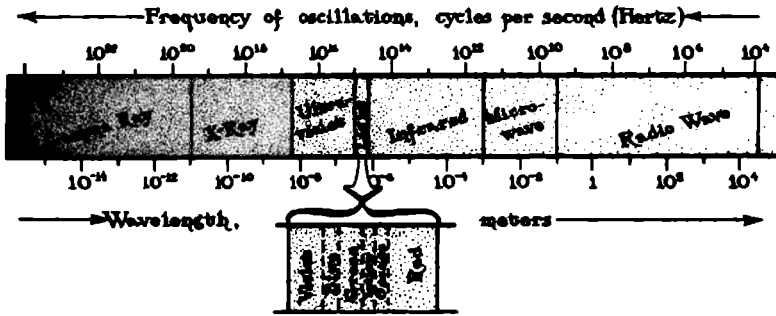


ص 1: تندفق ذرات الغاز التي تسحبها جاذبية الثقب الأسود نحو الثقب من جميع الاتجاهات.

على شاشة الفيديو الخاصة بسفينتك، ترى أنت وطاقمك دليلاً على وجود الثقب: ذرات الغاز التي تسكن الفضاء بين-النجوم بشكل متناثر -قاربة ذرة واحدة لكل سنتيمتر مكعب- تسحبها جاذبية الثقب (الشكل ص 1). وهي تندفق نحو الثقب من جميع الاتجاهات، ببطء على مسافات كبيرة، حيث تسحبها الجاذبية بشكل ضعيف، ثم تزيد سرعتها بالقرب من الثقب حيث تكون الجاذبية أقوى، وبسرعة أكبر -بسرعة الضوء تقريباً- كلما اقتربنا أكثر من الثقب حيث تكون الجاذبية أقوى. إذا تمت الأمور كما هي ولم تفعل شيئاً ما، فسيمتص الثقب الأسود سفينتك الفضائية أيضاً.

بسرعة وحذر، تقوم زميلتك الأولى، كاريس، بمناورة السفينة إلى مدار دائري للهروب من الغرق، ثم ستوقف تشغيل المحركات. في أثناء تحليقك الهادئ/ تشاطؤك حول الثقب (التساحل أو التشاطؤ هو مناورة الطيران أو التحليق الحذر الهادئ وخاصة بالقرب من مناطق الجاذبية الشديدة حيث يتلمس القائد المدار تلو المدار بروية كمن يتلمس الشاطئ)، فإن قوة الطرد المركزي لحركتك الدائرية تدفع سفينتك في مواجهة قوة سحب جاذبية

الثقب. إن سفيتك تشبه لعبة المقلاع - التي كنت تلعبها في طفولتك - في نهاية خيط دوار، تدفعها قوة الطرد المركزي إلى الخارج ويثبتها شد الخيط، والذي يتقارب في هذا المثال مع جاذبية الثقب. بينما تطفو السفينة الفضائية، تستعد وطاقتك لاستكشاف الثقب.



ص 2: طيف الموجات الكهرومغناطيسية، بدءاً من موجات الراديو ذات الأطوال الموجية الطويلة جداً (ترددات منخفضة جداً) إلى أشعة جاما ذات الأطوال الموجية القصيرة جداً (ترددات عالية جداً). لمناقشة الترميز المستخدم هنا للأرقام (10^{-12} , 10^{21} ، إلخ)، انظر الإطار ص 1 أدناه.

في البداية، تقوم بالاستكشاف بشكل سلبي: حيث تستخدم التلسكوبات المجهزة لدراسة الموجات الكهرومغناطيسية (الإشعاع) التي تشعها الغازات في أثناء تدفقها نحو الثقب. وبعيداً عن الثقب، تكون ذرات الغاز باردة، حيث ترتفع درجة حرارتها بضع درجات فقط فوق الصفر المطلق. كونها باردة، فإنها تهتز ببطء. وتنتج اهتزازاتها البطيئة موجات كهرومغناطيسية متأرجح ببطء، مما يعني موجات ذات مسافات طويلة بين قمة كل موجة إلى قمة الموجة الأخرى - أي أطوال موجية طويلة. هذه هي موجات الراديو. انظر الشكل ص 2. وبالقرب من الثقب، حيث تسحب الجاذبية الذرات في تيار أسرع (من ذرات الغاز)، فإنها تتصادم بعضها مع بعض وتسخن حتى عدة آلاف من الدرجات. الحرارة تجعلها تهتز بسرعة أكبر وتنبعث منها موجات متذبذبة ذات طول موجي أقصر بسرعة أكبر، وهي موجات تعرف أنها ضوء ذو ألوان متنوعة: الأحمر والبرتقالي والأصفر والأخضر والأزرق والبنفسجي (الشكل ص 2). بالقرب من الثقب، حيث الجاذبية أقوى كثيراً والتيار أسرع كثيراً، تسخن الاصطدامات الذرات إلى عدة ملايين من الدرجات، وتهتز بسرعة كبيرة، وتنتج موجات كهرومغناطيسية ذات طول موجي قصير جداً: الأشعة

السينية. عند رؤية تلك الأشعة السينية تندفق من محيط الثقب، ستذكر أنه من خلال اكتشاف ودراسة مثل هذه الأشعة السينية، حدد علماء الفيزياء الفلكية في عام 1972 أول ثقب أسود في الفضاء البعيد: الدجاجة س-1، والذي يبعد 6000 سنة ضوئية عن الأرض³.

وبتدوير التلسكوبات الخاصة بك بالقرب من الثقب، ترى أشعة جاما الصادرة من الذرات ساخنة إلى درجات حرارة أعلى. ثم، في وسط هذا العرض الرائع، ترى كرة كبيرة مستديرة سوداء تمامًا؛ إنه الثقب الأسود، الذي يحجب كل الضوء والأشعة السينية وأشعة جاما القادمة من الذرات الموجودة خلفه. بينما تشاهد هذا العرض تندفق الذرات فائقة السخونة إلى الثقب الأسود من جميع الجوانب. وبمجرد دخولها إلى الثقب، يجب أن تسخن بحرارة أعلى وأن تهتز بشكل أسرع وتشتع بقوة أكبر، كل أولئك أكثر من أي وقت مضى، لكن إشعاعها لا يمكنه الهروب من الجاذبية الشديدة للثقب. لا شيء يمكنه الهروب. ولهذا السبب يبدو الثقب أسود اللون، بل حالك السواد⁴.

باستخدام التلسكوب الخاص بك، يمكنك فحص الكرة السوداء عن كثب. لها حافة حادة تمامًا، هي سطح الثقب، هي المكان الذي اسمه «لا مفر». وأي شيء فوق هذا السطح مباشرة، بجهد كافٍ، يمكنه الإفلات من قبضة الجاذبية: يمكن للمصاروخ أن ينطلق بحرية؛ يمكن للجسيمات، إذا أُطلقت إلى الأعلى بسرعة كافية أن تفلت؛ يمكن للضوء الهروب. ولكن أسفل السطح مباشرة، تكون قبضة الجاذبية لا هوادة فيها؛ لا شيء يمكنه أن يهرب من هناك، بصرف النظر عن مدى الجهد المبذول في محاولته: لا الصواريخ، ولا الجسيمات، ولا الضوء، ولا الإشعاع من أي نوع؛ لا يمكنها أبدًا الوصول إلى السفينة الفضائية التي تدور حوله. وبالتالي، فإن سطح الثقب يشبه الأفق على الأرض، الذي لا يمكنك الرؤية خلفه. ولهذا سمي بأفق الثقب الأسود⁵.

تقيس زميلتك الأولى، كاريس، محيط مدار السفينة الفضائية بعناية. إنه مليون كيلومتر واحد؛ أي نحو نصف محيط مدار القمر حول الأرض. ثم بينما تنظر إلى النجوم البعيدة وتشاهدها وهي تدور بالأعلى، تتحرك السفينة. ومن خلال توقيت حركاتها الظاهرة، تستنتج أن الأمر يستغرق 5 دقائق و46 ثانية حتى تطوق السفينة الثقب مرة واحدة. هذه هي الفترة المدارية للسفينة.

ومن خلال الفترة المدارية والمحيط، يمكنك الآن حساب كتلة الثقب. إن طريقتك في الحساب هي نفسها التي استخدمها إسحاق نيوتن في عام 1685 لحساب كتلة الشمس: كلما زادت كتلة الجرم الفضائي (الشمس أو الثقب)، زادت قوة جاذبيته، وبالتالي يجب أن يكون الجسم الذي يدور حولهما أسرع «الكوكب أو السفينة الفضائية» ستتحرك بهذه السرعة لتجنب التعرض للامتصاص من الجرم السماوي ذي الجاذبية، وبالتالي يجب أن تكون الفترة المدارية للجسم أقصر. ومن خلال تطبيق نسخة نيوتن الرياضية لقانون الجاذبية على مدار سفينتك، فإنك تحسب أن كتلة الثقب الأسود حادس أكبر بعشر مرات من كتلة الشمس «10 كتل شمسية»⁷.

إنك تعلم أن هذا الثقب قد نشأ منذ فترة طويلة بسبب موت نجم، وهو الموت الذي فيه لم يعد النجم قادرًا على مقاومة الشد الداخلي لجاذبيته، وانفجر على ذاته⁸. كما تعلم أيضًا أنه عندما انفجر النجم لم تتغير كتلته؛ يتمتع الثقب الأسود حادس اليوم بنفس كتلة نجمه الأم منذ فترة طويلة، أو تقريبًا نفس الكتلة. يجب أن تكون كتلة حادس في الواقع أكبر قليلًا، معززة بكتلة كل شيء سقط في الثقب منذ ولادته: الغاز بين-النجوم، والصخور، والسفن الفضائية...

إنك تعرف كل هذا لأنك، قبل الشروع في رحلتك، درست القوانين الأساسية للجاذبية: القوانين التي اكتشفها إسحاق نيوتن بشكل تقريبي في عام 1687، ونقحها جذريًا ألبرت أينشتاين إلى شكل أكثر دقة في عام 1915⁹. إن قوانين الجاذبية لأينشتاين، والتي تسمى النسبية العامة، تجبر الثقوب السوداء على التصرف بهذه الطرق، بنفس الطريقة التي تجبر بها حجرًا على السقوط فوق الأرض. من المستحيل أن ينتهك الحجر قوانين الجاذبية فيسقط للأعلى أو يحوم في الهواء، وبالمثل، من المستحيل أن يتهرب الثقب الأسود من قوانين الجاذبية: يجب أن يولد الثقب عندما يتفجر نجم على ذاته؛ ويجب أن تكون كتلة الثقب عند ولادته مساوية لكتلة النجم؛ وفي كل مرة يسقط شيء ما داخل الثقب، يجب أن تنمو كتلته¹⁰. وبالمثل، إذا كان النجم يلف محوريًا spinning في أثناء انفجاره الداخلي implodes، يجب أن يلف محوريًا الثقب الوليد أيضًا؛ ويجب أن تكون كمية الحركة الزاوية للثقب (وهو مقياس دقيق لمدى سرعة اللف المحوري للنجم (دورانه حول محور مركزه))، هي نفس كمية الحركة الزاوية الخاصة بالنجم.

قبل رحلتك، درست أيضًا تاريخ الفهم البشري للثقوب السوداء. في سبعينيات القرن

العشرين، استنتج براندون كارتر، وستيفن هو كينج، وفيرنر إسرائيل، وآخرون، باستخدام وصف النسبية العامة¹¹ لأينشتاين لقوانين الجاذبية، أن الثقب الأسود لا بد أن يكون وحشًا بسيطاً للغاية¹²: جميع خصائص الثقب - قوة سحب جاذبيته، والمقدار الذي تنحرف به مسارات ضوء النجوم، وشكل وحجم سطحه - تحدد من خلال ثلاثة أرقام فقط: كتلة الثقب، التي تعرفها الآن؛ وكمية الحركة الزاوية لدورانه، والتي لا تعرفها بعد؛ وشحنته الكهربائية. بالإضافة إلى ذلك، تدرك أنه لا يوجد ثقب في الفضاء بين-النجوم يمكن أن يحتوي على الكثير من الشحنات الكهربائية؛ وإذا حدث ذلك، فإنه سيسحب بسرعة شحنات معاكسة من الغاز الموجود بين-النجوم، وبالتالي سيقوم بتحييد شحنته.

في أثناء دورانه، يجب أن يسحب الثقب الفضاء القريب منه في حركة دوامية تشبه الإعصار مقارنة بالمناطق الأبعد في الفضاء السحيق، بنفس شكل حركة الهواء الذي تسحبه مروحة الطائرة الدوارة بالقرب منها؛ ودوامة الفضاء يجب أن تسبب دوامة في حركة أي شيء قريب من الثقب¹³.

لمعرفة كمية الحركة الزاوية لحادس، عليك أن تبحث عن دوامة تشبه الإعصار في تيار ذرات الغاز بين-النجوم في أثناء سقوطها في الثقب. ولدهشتك، عندما تقترب أكثر فأكثر من الثقب، وتحرك بشكل أسرع فأسرع، لا توجد علامة على الإطلاق على وجود أي دوامة. وتدور بعض الذرات حول الثقب في اتجاه عقارب الساعة في أثناء سقوطها؛ والبعض الآخر يدور حولها عكس اتجاه عقارب الساعة ويصطدم أحيانًا بالذرات التي تدور في اتجاه عقارب الساعة. ولكن في المتوسط، يكون سقوط الذرات نحو الداخل مباشرة (مباشرة نحو الأسفل) من دون أي دوامة. استنتاجك: هذا الثقب الأسود الذي تبلغ كتلته 10 كتل شمسية لا يدور على الإطلاق؛ كمية الحركة الزاوية له قريبة من الصفر. بمعرفة كتلة الثقب وكمية الحركة الزاوية ومعرفة أن شحنته الكهربائية ينبغي أن تكون صغيرة بشكل مهمل، يمكنك الآن حساب جميع الخصائص التي يمكن أن يتمتع بها الثقب باستخدام صيغ النسبية العامة: قوة سحب الجاذبية، وقوتها المقابلة لتشتيت ضوء النجوم، والأهم من ذلك، شكل وحجم أفقه.

لو كان الثقب يدور، لكان لأفقه قطبان شمالي وجنوبي محددان جيدًا، القطبان اللذان يلف محورًا حولهما، وتدور حولهما الذرات المتساقطة. سيكون له خط استواء محدد

جيدًا في منتصف المسافة بين القطبين، كما أن قوة الطرد المركزي لدوران الأفق ستجعل خط استوائها ينتفخ للخارج¹⁴، تمامًا كما ينتفخ خط استواء الأرض التي تدور قليلًا. لكن حادس يدور بصعوبة تمامًا، وبالتالي لا يكاد يكون به أي انتفاخ استوائي. تحكم قوانين الجاذبية على أفقه بأن يتخذ شكلًا كرويًا دقيقًا تقريبًا. هذا هو بالضبط ما يبدو من خلال التلسكوب الخاص بك.

أما الحجم، فإن قوانين الفيزياء، كما تصفها النسبية العامة، تصر على أنه كلما زادت ضخامة الثقب، كان أفقه أكبر. في الواقع، يجب أن يكون محيط الأفق 18.5 كيلومتر مضروبًا في كتلة الثقب بوحدات كتلة الشمس¹⁵. وبما أن قياساتك المدارية أخبرتك أن الثقب يزن عشرة أمثال وزن الشمس، يجب أن يكون محيط الأفق 185 كيلومترًا، أي نفس محيط لوس أنجلوس تقريبًا. باستخدام التلسكوبات الخاصة بك، يمكنك قياس المحيط بعناية: 185 كيلومترًا؛ هنا اتفاق تام مع القانون الرياضي للنسبية العامة.

محيط الأفق هذا صغير جدًا مقارنة بمدار السفينة الفضائية الذي يبلغ مليون كيلومتر؛ والانضغاط عند هذا المحيط الصغير تسببه كتلة أكبر بعشر مرات من كتلة الشمس! إذا كان الثقب جسمًا صلبًا محصورًا في مثل هذا المحيط الصغير، فإن متوسط كثافته سيكون 200 مليون (2×10^8) طن لكل سنتيمتر مكعب - أي 2×10^{14} مرة قدر كثافة الماء؛ انظر الإطار ص 1. لكن الثقب ليس جسمًا صلبًا. تصر النسبية العامة على أن 10 كتل شمسية من المادة النجمية، والتي خلقت الثقب عن طريق الانفجار الداخلي منذ فترة طويلة، تتركز الآن في مركز الثقب ذاته - مركزة في منطقة صغيرة من الفضاء تسمى المفردة¹⁶. هذه المفردة، نحو 10^{-33} سنتيمتر في الحجم (أصغر بمائة مليار مليار مرة من نواة الذرة)، ينبغي أن تكون محاطة بفراغ خالص، بصرف النظر عن الغاز بين-النجمي الهش الذي يتساقط نحو الداخل الآن والإشعاع الذي ينبعث من الغاز. يجب أن يكون هناك فراغ قريب بين المفردة وأفق الثقب الأسود، وفراغ قريب بين أفق الثقب الأسود وسفيتتك الفضائية.

الإطار ص1

تدوين الأس للأعداد الكبيرة والصغيرة

في هذا الكتاب، سأستخدم أحياناً «تدوين الأس» لوصف الأعداد الكبيرة جداً أو الصغيرة جداً. ومن الأمثلة على ذلك $10^6 \times 5$ ، وهو ما يعني خمسة ملايين، أو $5.000.000$ ، و $10^{-6} \times 5$ ، وهو ما يعني خمسة أجزاء من المليون، أو 0.000005 .

بشكل عام، الأس الذي يرفع إلى الرقم 10 هو عدد الأرقام التي يجب من خلالها تحريك العلامة العشرية من أجل وضع الرقم في التدوين العشري القياسي. وبالتالي فإن $10^6 \times 5$ تعني خذ 5 (5.00000000) وحرك العلامة العشرية إلى اليمين ستة أرقام. والنتيجة هي 5000000.00 وبالمثل، $10^{-6} \times 5$ تعني خذ 5 وحرك العلامة العشرية لليسار ستة أرقام. والنتيجة هي 0.000005 .

يخفي أفق الثقب الأسود المفردة والمادة النجمية المحبوستين فيه. ومهما طال الانتظار، فإن الأمر المحبوس لا يمكن أن يظهر من جديد أبداً. وجاذبية الثقب تمنع ذلك. ولا يمكن للمادة المحبوسة أن ترسل لك معلومات، لا عن طريق موجات الراديو، ولا الضوء، ولا الأشعة السينية. ولجميع الأغراض العملية، فقد اختفى تمامًا من كوننا. الشيء الوحيد الذي تركه خلفه هو سحب الجاذبية الشديد، وهو نفس السحب في مدارك الذي يبلغ طوله مليون كيلومتر اليوم كما كانت الحال قبل انفجار النجم ليشكل الثقب، ولكنه سحب قوي جداً عند الأفق وداخله بحيث لا يمكن لأي شيء هناك أن يقاومه.

«ما المسافة من الأفق إلى المفردة؟»، ستسأل نفسك. (اخترت عدم قياسه بالطبع. مثل هذا القياس سيكون بمثابة انتحار؛ فلن تتمكن أبداً من الهرب من الأفق لإبلاغ نتائجك إلى الجمعية الجغرافية العالمية). نظرًا لأن المفردة صغيرة جداً، 10^{-33} سنتيمتر، وتكون في مركز الثقب بالضبط، فإن المسافة بين المفردة والأفق يجب أن تكون مساوية لنصف قطر الأفق. تميل إلى حساب نصف القطر هذا بالطريقة القياسية بقسمة المحيط على 2π أو ما يساوي (6.283185307...). ومع ذلك، في دراستك على الأرض، حذروك من تصديق مثل هذه الحسابات. إن قوة الجاذبية الهائلة للثقب تشوه تمامًا هندسة الفضاء داخل الثقب

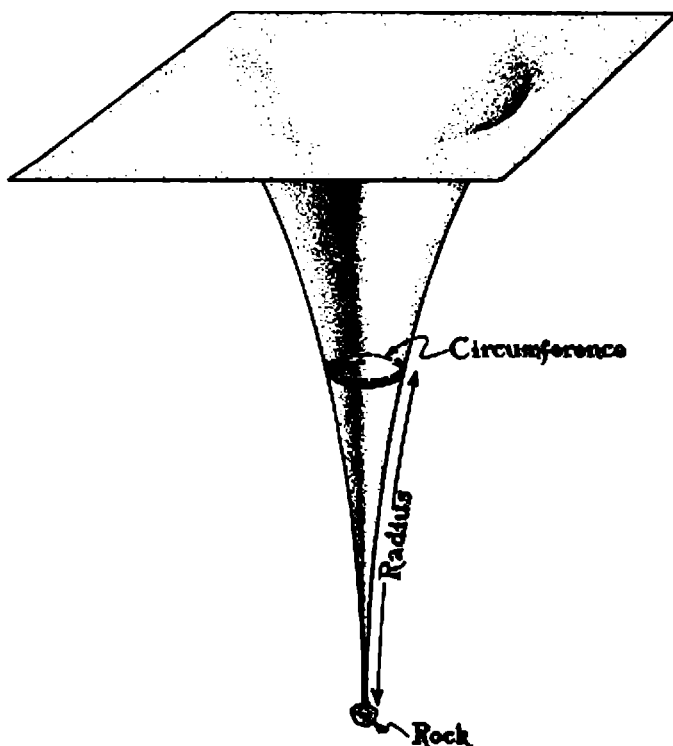
وبالقرب منه¹⁷، بنفس الطريقة التي تشوّه بها صخرة ثقيلة للغاية هندسة لوح من المطاط موضوعة عليه (الشكل ص 3). ونتيجة لذلك، فإن نصف قطر الأفق لا يساوي محيطه مقسومًا على 2π .

«لا يهم»، ستحدّث نفسك. «لقد علّمنا لوباتشيفسكي وريمان وغيرهما من علماء الرياضيات العظماء كيفية حساب خصائص الدوائر عندما يكون الفضاء/ المكان منحنيًا، وقد دمج أينشتاين هذه الحسابات في وصفه النسبي العام لقوانين الجاذبية. يمكنني استخدام صيغ الفضاء/ المكان المنحني هذه لحساب نصف قطر الأفق».

لكن بعد ذلك تتذكر من دراساتك على الأرض أنه على الرغم من أن كتلة الثقب الأسود وكمية الحركة الزاوية تحددان جميع خصائص أفق الثقب وما خارجه، فإنهما لا تحددان باطنه. تصر النسبية العامة على أن الجزء الداخلي، بالقرب من المفردة، يجب أن يكون فوضويًا وغير كروي إلى حد كبير¹⁸، يشبه كثيرًا طرف اللوح المطاطي في الشكل ص 3، إذا كانت الصخور الثقيلة فيها خشنة وترتد لأعلى ولأسفل بعنف. بالإضافة إلى ذلك، فإن الطبيعة الفوضوية لقلب الثقب لن تعتمد فقط على كتلة الثقب وكمية الحركة الزاوية، ولكن أيضًا على تفاصيل الانهيار النجمي الذي نشأ من خلاله الثقب، وتفاصيل السقوط اللاحق للغاز بين-النجوم، وهي تفاصيل لا تُعرف.

«وماذا في ذلك؟»، تحدّث ذاتك. «مهما كان هيكلها، يجب أن يكون محيط النواة الفوضوية أصغر بكثير من سنتيمتر واحد. وبالتالي، لن أرتكب سوى خطأ بسيط إذا تجاهلته عند حساب نصف قطر الأفق».

لكن بعد ذلك تتذكر أن الفضاء/ المكان يمكن أن يكون مشوهًا للغاية بالقرب من المفردة، بحيث قد يصل نصف قطر المنطقة الفوضوية إلى ملايين الكيلومترات على الرغم من أن محيطها لا يتجاوز جزءًا من السنتيمتر، تمامًا كما يمكن للصخرة في الشكل ص 3، إذا كانت ثقيلة بدرجة كافية، فستدفع الطرف الفوضوي للوح المطاطي إلى الأسفل بشكل كبير مع ترك محيط المنطقة الفوضوية صغيرًا للغاية. وبالتالي قد تكون الأخطاء في نصف القطر المحسوب هائلة. إن نصف قطر الأفق ببساطة غير قابل للحساب من خلال المعلومات الضئيلة التي تمتلكها: كتلة الثقب وكمية الحركة الزاوية له.



ص 3: يؤدي وضع صخرة ثقيلة على لوح مطاطي (الترامبولين على سبيل المثال) إلى تشويه اللوح كما هو موضح. تشبه الهندسة المشوهة للوح إلى حد كبير تشوهات هندسة الفضاء/ المكان حول الثقب الأسود وداخله. على سبيل المثال، محيط الدائرة السوداء السميكة أقل بكثير من 2π مضروباً في نصف قطرها، تمامًا كما أن محيط أفق الثقب أقل بكثير من 2π مضروباً في نصف قطرها. لمزيد من التفاصيل، انظر الفصلين الثالث والثالث عشر.

بعد أن تتخلى عن تأملاتك حول الجزء الداخلي من الثقب، فإنك تستعد لاستكشاف المنطقة المجاورة لأفق. لعدم رغبتك في المخاطرة بحياة الإنسان، تطلب من روبوت مزود بصاروخ يبلغ طوله 10 سنتيمترات يُدعى أرنولد أن يقوم بالاستكشاف نيابةً عنك، وينقل النتائج مرة أخرى إلى سفيتك الفضائية. لدى أرنولد تعليمات بسيطة: يجب عليه أولاً أن يشغل محركاته الصاروخية بما يكفي لوقف الحركة الدائرية التي شاركها مع السفينة الفضائية، وبعد ذلك يجب عليه إيقاف تشغيل محركاته والسماح لجاذبية الثقب

بسحبه مباشرة إلى الأسفل. في أثناء سقوطه، يجب على أرنولد أن يرسل شعاع ليزر أخضر لامعاً إلى السفينة الفضائية، وعلى التذبذبات الكهرومغناطيسية للشعاع يجب عليه تفسير المعلومات حول المسافة التي قطعها وحالة أنظمتها الإلكترونية، مثلما تقوم محطة الراديو بتفسير نشرة الأخبار على موجات الراديو التي تنقلها.

بالعودة إلى السفينة الفضائية، سيتلقى طاقمك شعاع الليزر، وستفك شفرته كاريس للحصول على معلومات المسافة والنظام. ستقيس أيضًا الطول الموجي للشعاع (أو ما يعادله، والمعنى هو لونه، انظر الشكل ص 2). الطول الموجي مهم. إنه يوضح مدى سرعة تحرك أرنولد. وبينما يتحرك بشكل سريع متزايد بعيدًا عن السفينة الفضائية، فإن الشعاع الأخضر الذي يرسله يتعرض لانزياح دوبلر¹⁹، كما استقبلته السفينة، في أطوال موجية أطول تتزايد باستمرار؛ أي أنه يصبح أحمر أكثر فأكثر. (هناك انزياح إضافي إلى اللون الأحمر ناجم عن صراع الشعاع ضد جاذبية الثقب. عند حساب سرعة أرنولد، يجب على كاريس تصحيح حساباتها لهذا الانزياح بفعل الجاذبية نحو اللون الأحمر 20).

وهكذا تبدأ التجربة. يشق أرنولد طريقه للخروج من المدار وفي مسار هابط. عندما يبدأ في السقوط، تبدأ ساعة كاريس في ضبط وصول إشارات الليزر الخاصة به. وبعد مرور 10 ثوانٍ، تشير إشارة الليزر التي فكّت شفرتها إلى أن جميع أنظمتها تعمل بشكل جيد، وأنه قد قطع بالفعل مسافة 2630 كيلومترًا. ومن لون ضوء الليزر، تحسب كاريس أنه يتحرك الآن نحو الداخل بسرعة 530 كيلومترًا في الثانية. وعندما تصل الساعة إلى 20 ثانية، تتضاعف سرعته إلى 1060 كيلومترًا في الثانية، وتتضاعف مسافة سقوطه أربع مرات إلى 10500 كيلومتر. تدق الساعة وتحسب. وفي 60 ثانية تبلغ سرعته 9700 كيلومتر في الثانية، وقد سقط 135 ألف كيلومتر؛ أي خمسة أضعاف الطريق إلى الأفق.

يجب عليك الآن أن تُولي اهتمامك بدقة كبيرة وبحذر أكبر. ستكون الثواني القليلة القادمة حاسمة، لذلك تقوم كاريس بتشغيل نظام تسجيل عالي السرعة لجمع كل تفاصيل البيانات الواردة.

في الثانية 61، أبلغ أرنولد أن جميع الأنظمة لا تزال تعمل بشكل طبيعي؛ الأفق يقع تحته بـ 14000 كيلومتر وهو يسقط نحوه بسرعة 13000 كيلومتر في الثانية.

في الثانية 61.7، لا يزال كل شيء على ما يرام، تبقى 1700 كيلومتر، بسرعة 39000

كيلومتر في الثانية، أو نحو عُشر سرعة الضوء، ويبدأ لون الليزر في التغير بسرعة.

في عُشر الثانية التالية ستشاهد بذهول لون الليزر ينتقل عبر الطيف الكهرومغناطيسي، من الأخضر إلى الأحمر، إلى الأشعة تحت الحمراء، إلى الموجات الميكروية، إلى موجات الراديو، إلى ...

بحلول الثانية 61.8، ينتهي كل شيء. ذهب شعاع الليزر تمامًا. وصل أرنولد إلى سرعة الضوء واختفى في الأفق. وفي ذلك العُشر الأخير من الثانية، قبل أن ينطفئ الشعاع مباشرة، كان أرنولد يُبلغ بسعادة بلهاء:

«إن كل الأنظمة تنهار، كل الأنظمة تنهار، الأفق يقترب، كل الأنظمة تنهار، كل الأنظمة تنهار...».

بعدما تهدأ الإثارة. ستفحص البيانات المسجلة. ستجد هناك التفاصيل الكاملة لطول موجة الليزر المتغير. ترى أنه مع سقوط أرنولد، زاد الطول الموجي لإشارة الليزر ببطء شديد في البداية، ثم زاد بشكل أسرع فأُسرع. ولكن من المدهش أنه بعد أن تضاعف الطول الموجي أربع مرات، أصبح معدل تضاعفه ثابتًا تقريبًا؛ وبعد ذلك تضاعف الطول الموجي كل 0.00014 ثانية. وبعد 33 مضاعفة (0.0046 ثانية)، وصل الطول الموجي إلى 4 كيلومترات، وهو الحد الأقصى لقدرة نظامك على التسجيل. ومن المفترض أن الطول الموجي ظل يتضاعف بعد ذلك، نظرًا لأن الأمر يتطلب عددًا لا نهائيًا من المضاعفات حتى يصبح الطول الموجي لا نهائيًا، خائفًا للغاية، فقد لا تزال إشارات الطول الموجي الطويل للغاية تظهر بالقرب من الأفق!

هل هذا يعني أن أرنولد لم يعبر الأفق بعد ولن يفعل ذلك أبدًا؟

لا، على الإطلاق. تستغرق تلك الإشارات الأخيرة التي تتضاعف إلى الأبد وقتًا طويلًا للخروج من قبضة جاذبية الثقب.

لقد طار أرنولد عبر الأفق، متحركًا بسرعة الضوء، منذ عدة دقائق. تستمر الإشارات الضعيفة المتبقية في الظهور فقط لأن وقت انتقالها طويل جدًا. فهي من بقايا الماضي²¹.

بعد ساعات طويلة من دراسة البيانات بعد سقوط أرنولد، وبعد نوم طويل لتنشط ذاتك، تشرع في المرحلة التالية من الاستكشاف. هذه المرة ستستكشف أنت بنفسك محيط الأفق، لكنك ستفعل ذلك بحذر أكبر مما فعله أرنولد.

ستودع طاقمك، ثم ستصعد إلى كبسولة فضائية وتنزل من بطن السفينة إلى مدار دائري بجانبها. ثم تقوم بعد ذلك بتشغيل محركاتك الصاروخية بلطف شديد لإبطاء حركتك المدارية قليلاً. وهذا يقلل قليلاً من قوة الطرد المركزي التي تحمل الكبسولة التي تقودها، ومن ثم تسحبك جاذبية الثقب إلى مدار دائري أصغر قليلاً. عندما تقوم بتشغيل محركاتك بلطف مرة أخرى، فإن مدارك الدائري ينكمش بلطف مرة أخرى. هدفك، من خلال هذه الدوامة الداخلية اللطيفة والأمنة، هو الوصول إلى مدار دائري فوق الأفق مباشرة، وهو مدار يبلغ محيطه 1.0001 مرة فقط أكبر من الأفق نفسه. هناك يمكنك استكشاف معظم خصائص الأفق، ولكن لا يزال بإمكانك الهروب من قبضته القاتلة.

ومع ذلك، عندما ينكمش مدارك ببطء، يبدأ شيء غريب بالحدوث. بالفعل عند محيط قدره 100000 كيلومتر تشعر بذلك. عندما تطفو داخل الكبسولة وقدماك نحو الثقب ورأسك نحو النجوم، ستشعر بشد ضعيف لقدميك إلى الأسفل وبشد على رأسك إلى أعلى؛ ستمدد مثل قطعة من حلوى الطوفي، ولكن بلطف. السبب هو، كما تعلم، جاذبية الثقب: قدماك أقرب إلى الثقب من رأسك، لذلك فإن الثقب يسحبهما بقوة أكبر من رأسك. وينطبق الشيء نفسه، بالطبع، عندما تقف على الأرض، لكن الفرق بين تأثير الشد على الرأس والقدم في الأرض ضئيل جداً، أقل من جزء واحد من المليون، لدرجة أنك لم تلاحظه قط. على النقيض من ذلك، عندما تطفو في كبسولتك على محيط يبلغ 100 ألف كيلومتر حول الثقب الأسود، فإن الفرق بين الرأس إلى القدم هو ثمن الجاذبية الأرضية ($1/8g$). في مركز جسمك، تعمل قوة الطرد المركزي لحركتك المدارية على مقاومة قوة سحب الثقب. وكان الجاذبية الشديدة غير موجودة؛ فأنت تطفو بحرية. لكن عند قدميك، فإن الجاذبية الأقوى تسحبهما للأسفل مع إضافة $1/16g$ ، وعند رأسك الجاذبية الأضعف تسمح لقوة الطرد المركزي بدفع رأسك للأعلى مع إضافة $1/16g$.

مرتبكاً، تواصل التحليق داخل دوامتك الداخلية، لكن ارتباكك سرعان ما يتحول إلى قلق. كلما أصبح مدارك أصغر، زادت القوى المؤثرة على رأسك وقدميك. عند محيط يبلغ 80 ألف كيلومتر، يكون الفرق هو قوة تمدد قدرها $1/4g$ ؛ وعلى ارتفاع 50 ألف كيلومتر، تصبح قوة التمدد مساوية لجاذبية الأرض بالكامل؛ وعلى مسافة 30 ألف كيلومتر، تساوي 4 قدر الجاذبية الأرضية. بينما تصر على أسنانك وأنت تشعر بالألم، يبعد رأسك عن قدميك، وتستمر في قطع مسافة 20 ألف كيلومتر بقوة تمدد تبلغ

15g. لا يمكنك أن تتحمل أكثر من هذا! تحاول حل المشكلة عن طريق ضم جسدك في كرة ضيقة بحيث يكون رأسك وقدماك أقرب إلى بعضهما ويكون الفرق في القوى أصغر، لكنها تصبح قوية جدًا لدرجة أنها لن تسمح لك بالتكوم؛ إنها تعيدك للخارج بشكلك المستقيم من الرأس إلى القدم. إذا دارت الكبسولة بشكل حلزوني أكثر، فسوف يستسلم جسدك؛ سوف تتمزق! ولا أمل لك في الوصول إلى محيط الأفق.

محبطاً ومتألماً بشدة، ستتوقف عن النزول بكبسولتك، ثم ستديرها، وبعبارة ولطف ستشق طريقك للأعلى عبر مدارات دائرية مشاطئة ذات محيط أكبر وأكبر، ثم ستدخل إلى بطن السفينة الفضائية.

عند دخولك غرفة القبطان، يمكنك التنفيس عن إحباطاتك بالجدال العنيف مع الحاسوب الرئيسي للسفينة، داون.

«تيخي، تيخي» (هدئ أعصابك)، تقول بهدوء (تستمد كلمات من اللغة الروسية القديمة).

«أعلم أنك منزعج، لكن هذا خطأك في الحقيقة. لقد أخبرت بتلك القوى المباشرة في تدريبك. هل تذكر؟ إنها نفس القوى التي تنتج المد والجزر في محيطات الأرض»²².

تسترجع فترة تدريبك، تذكر أن المحيطات الموجودة على جانب الأرض الأقرب للقمر تسحبها بقوة أكبر جاذبية القمر، وبالتالي تنتفخ نحو القمر. تسحب المحيطات الموجودة على الجانب الآخر من الأرض بشكل أضعف وبالتالي تنتفخ بعيداً عن القمر. والنتيجة هي انتفاخان محيطيان. ومع دوران الأرض، تظهر تلك الانتفاخات على شكل مَدَّين مرتفعين كل أربع وعشرين ساعة. تكرّماً للمد والجزر، كما تذكر مع الحاسوب، فإن قوة الجاذبية التي شعرت بها من الرأس إلى القدم تسمى قوة المد والجزر. تذكر أيضاً أن النسبية العامة لأينشتاين تصف قوة المد والجزر هذه بأنها ناتجة عن انحناء المكان واعوجاج الزمن، أو، بلغة أينشتاين، انحناء الزمكان²³. تفتقر قوى المد والجزر بتشوهات الزمكان دائماً؛ إحداها ترافق الأخرى، على الرغم من أنه في حالة المد والجزر في المحيطات، يكون تشويه الزمكان صغيراً جداً بحيث لا يمكن قياسه إلا بأدوات دقيقة للغاية.

ولكن ماذا عن أرنولد؟ لماذا كان محصناً بكل هذه السعادة ضد قوة المد والجزر في الثقب؟

لسبيين، تشرح داون: أولاً، لأنه أصغر منك بكثير، حيث يبلغ طوله 10 سنتيمترات فقط، وبالتالي فإن قوة المد والجزر، وهي الفرق بين قوى الجاذبية عند رأسه وقدميه، أصغر كثيراً بالمقابل.

وثانياً، لأنه مصنوع من سبيكة تيتانيوم فائقة القوة يمكنها تحمل قوة التمدد بشكل أفضل بكثير من عظامك ولحمك.

ثم تدرك برعب أنه عندما سقط عبر الأفق متجهًا نحو المفردة، لا بد أن أرنولد شعر بقوة المد والجزر ترتفع بقوة حتى إن جسمه المصنوع من التيتانيوم فائق القوة لم يتمكن من مقاومتها. وبعد أقل من 0.0002 ثانية من عبور الأفق، لا بد أن جسده الممتد والمنضغط قد اقترب من المفردة المركزية للثقب. هناك، كما تذكر من دراستك للنسبية العامة على الأرض، يجب أن تكون قوى المد والجزر في الثقب حاضرة بقوة، وترقص رقصة فوضوية، وتمد بقايا أرنولد أولاً في هذا الاتجاه، ثم في ذلك، ثم في اتجاه آخر، بسرعة متزايدة، وقوة متنامية، حتى إن الذرات الفردية التي خُلِق منها تصبح مشوهة بشكل لا يمكن به التعرف عليها. هذا في الواقع هو جوهر المفردة: إنها منطقة حيث انحناء الزمكان المتذبذب بشكل عشوائي يخلق قوى مد وجزر هائلة وفوضوية²⁴.

بالتأمل في تاريخ أبحاث الثقوب السوداء، تذكر أن الفيزيائي البريطاني روجر بنروز، في عام 1965، استخدم وصف النسبية العامة لقوانين الفيزياء لإثبات أن المفردة يجب أن توجد داخل كل ثقب أسود، وفي عام 1969، استخدمت الثلاثية الروسية (التريكا) ليفشيتز-خالاتنيكوف-بيلينسكي لاستنتاج أنه، بالقرب من المفردة، يجب أن يتأرجح المد والجزر بفعل الجاذبية بشكل فوضوي، مثل حلوى الطوفي التي تسحب أولاً بهذه الطريقة ثم بتلك بواسطة آلة سحب حلوى ميكانيكية²⁵. كانت تلك السنوات الذهبية لأبحاث الثقوب السوداء النظرية، الستينيات والسبعينيات! ولكن لأن الفيزيائيين في تلك السنوات الذهبية لم يكونوا أذكاء بما فيه الكفاية في حل معادلات النسبية العامة لأينشتاين، فقد استعصت عليهم إحدى السمات الرئيسية لسلوك الثقب الأسود. ولم يكن بوسعهم إلا أن يخمنوا أنه عندما يخلق نجم متفجر مفردة، فإنه يجب أيضاً أن يخلق أفقاً محيطاً يخفي المفردة عن الأنظار؛ لا يمكن أبداً إنشاء المفردة «عارية» ليراها الكون كله. أطلق بنروز على هذا اسم «حدسية الرقابة الكونية»، لأنه إذا كان صحيحاً، فإنه سيفرض رقابة على جميع المعلومات التجريبية حول المفردات: لا يمكن للمرء أبداً إجراء تجارب

لاختبار فهمه النظري للمفردات، إلا إذا كان المرء على استعداد لدفع ثمن الدخول إلى عالم الثقب الأسود، والموت في أثناء إجراء القياسات، وعدم القدرة حتى على نقل النتائج مرة أخرى إلى خارج الثقب كتذكّار لجهوده.

على الرغم من أن السيدة أبيجيل ليمان (شخصية افتراضية تنتمي للحكاية الوهمية)، في عام 2023 (باعتباره زمنيًا بعيدًا جدًا في المستقبل وقت كتابة الكتاب)، قد حلّت أخيرًا مسألة ما إذا كانت الرقابة الكونية صحيحة أم لا، فإن القرار لا يهكم الآن. المفردة الوحيدة المرسومة في أطالس سفيتتك هي تلك الموجودة داخل الثقوب السوداء، وأنت ترفض دفع الثمن لاستكشافها، حياتك.

لحسن الحظ، هناك العديد من الظواهر التي يجب استكشافها خارج أفق الثقب الأسود وبالقرب منه. أنت مصمم على اختبار تلك الظواهر بشكل مباشر وتقديم تقرير إلى الجمعية الجغرافية العالمية، لكن لا يمكنك تجربتها بالقرب من أفق حادس. قوة المد والجزر هناك كبيرة جدًا. يجب عليك، بدلًا من ذلك، استكشاف ثقب أسود يتمتع بقوى مد وجزر أضعف.

تنبأ النسبية العامة، وتذكّر كداون، أنه عندما تزداد ضخامة الثقب، فإن قوى المد والجزر عند أفق الثقب وفوقه تصبح أضعف. هذا السلوك الذي يبدو متناقضًا له أصل بسيط: تتناسب قوة المد والجزر مع كتلة الثقب مقسومة على مكعب محيطها، لذلك مع نمو الكتلة، ونمو محيط الأفق بشكل متناسب، تتناقص قوة المد والجزر القريبة من الأفق. بالنسبة إلى ثقب يبلغ وزنه مليون كتلة شمسية؛ أي أكبر بـ 100000 مرة من حادس، سيكون الأفق أكبر 100000 مرة، وستكون قوة المد والجزر هناك أضعف بـ 10 مليارات (10^{10}) مرة. سيكون ذلك مريحًا؛ لا ألم على الإطلاق! لذلك تبدأ في وضع خطط للمرحلة التالية من رحلتك: رحلة إلى أقرب ثقب تبلغ كتلته مليون كتلة شمسية مدرج في أطلس شيشتر للثقوب السوداء، وهو ثقب يُسمى ساجيتاريو (الرامي أو القوس) في مركز مجرتنا درب التبانة، على بُعد 30100 سنة ضوئية.

بعد عدة أيام، يرسل طاقمك إلى الأرض وصفًا تفصيليًا لاستكشافات حادس، بما في ذلك الصور المتحركة لك وأنت تتمدد بفعل قوة المد والجزر وصور الذرات التي تسقط في الثقب. سيتطلب الوصف 26 عامًا لتغطية مسافة 26 سنة ضوئية من الأرض، وعندما

يصل أخيراً سنشره الجمعية الجغرافية العالمية وسط حفاوة كبيرة.

في بنهم، سيصف الطاقم خطتك لرحلة إلى مركز درب التبانة: ستشغل محركات الصواريخ لسفيتك الفضائية بتسارع $1g$ طول الطريق، حتى تتمكن أنت وطاقمك من تجربة مريحة: 1 قدر قوة الجاذبية الأرضية في داخل السفينة الفضائية. ستتسارع السفينة باتجاه مركز المجرة خلال نصف الرحلة، ثم ستدور 180 درجة وتباطأ بمقدار $1g$ في النصف الثاني. ستطلب الرحلة الكاملة التي تبلغ 30100 سنة ضوئية 30102 سنة بالقياس الأرضي، ولكن بمقاييس سفيتك الفضائية، سيتطلب الأمر 20 عامًا فقط. وفقاً لقوانين النسبية الخاصة لأينشتاين²⁶، فإن السرعة العالية لسفيتك سوف تسبب في «تمدد» الزمن، بمقاييس السفينة؛ وهذا التمدد الزمني (أو الاعوجاج الزمني)، في الواقع، سيجعل السفينة الفضائية تتصرف مثل آلة الزمن، مما ينقلك بعيداً في مستقبل الأرض في حين تتقدم في السن بقدر بسيط²⁷.

تشرح للجمعية الجغرافية العالمية أن إرسالك التالي سيأتي من محيط مركز المجرة، بعد أن تكون قد استكشفت ثقبها ساجيتاريو الذي تبلغ كتلته مليون كتلة شمسية. يجب أن يدخل أعضاء الجمعية في حالة سبات شديد التجميد لمدة 60186 عامًا إذا كانوا يرغبون في البقاء أحياء حتى موعد إرسالك التالي ($30076 = 30102 - 26$) عامًا من وقت تلقيهم رسالتك حتى وصولك إلى مركز المجرة، بالإضافة إلى 30110 سنوات حتى تنتقل رسالتك التالية من مركز المجرة إلى الأرض).

القوس

بعد رحلة مدتها 20 عامًا، بمقاييس زمن السفينة الفضائية، تتباطأ سفيتك عند مركز درب التبانة. هناك على مسافة ترى خليطاً غنياً من الغاز والغبار يتدفق إلى الداخل من جميع الاتجاهات نحو ثقب أسود هائل. تعدل كارس من دفع صاروخ سفيتك لتحريكها إلى مدار تشاطو (مدار التحليق الهادئ) دائري أعلى بكثير من الأفق. ومن خلال قياس محيط ودورة مدارك وإدخال النتائج في الصيغة الرياضية لنيوتن، يمكنك تحديد كتلة الثقب. وتبلغ كتلته مليون مرة قدر كتلة الشمس، تمامًا كما ورد في أطلس شيشتر للثقوب السوداء. من خلال عدم وجود أي دوامة تشبه الإعصار في الغاز والغبار المتدفق، تستنتج

أن الثقب لا يدور تقريبًا، ولذلك يجب أن يكون أفقه كرويًا، ويجب أن يكون محيطه 18.5 مليون كيلومتر؛ أي أكبر بثمانى مرات من مدار القمر حول الأرض.

وبعد مزيد من التدقيق في الغاز المتساقط، تستعد للنزول نحو الأفق. من أجل السلامة، تعد كاريس رابط اتصال بالليزر بين كبسولتك الفضائية والحاسوب الرئيسي للمركبة الفضائية، داون. بعد ذلك، تسقط من بطن السفينة الفضائية، وتقلب كبسولتك بحيث تشير نفاثاتها في اتجاه حركتك المدارية، وتبدأ في تشغيلها بلطف لإبطاء حركتك المدارية وتدفع نفسك إلى دوامة لطيفة إلى الداخل (لأسفل) من أحد مدارات التشاؤم الدائرية إلى المدار التالي.

يسير كل شيء كما هو متوقع حتى تصل إلى مدار محيطه 55 مليون كيلومتر؛ أي ثلاثة أضعاف محيط الأفق فقط. هناك، يدفعك التشغيل اللطيف لمحرك الصاروخي إلى غرق انتحاري نحو الأفق، وذلك بدلًا من أن يقودك إلى مدار دائري أكثر إحكامًا. في حالة من الذعر، تقوم بتدوير كبسولتك وتشغل محركاتها بقوة كبيرة لتتحرك مرة أخرى إلى مدار خارج نطاق 55 مليون كيلومتر.

«ما هذا الذي حدث بحق الجحيم؟!»

تصبح في داون عن طريق رابط الليزر.

«تيخي، تيخي»، تجيب بهدوء، «لقد خططت لمدارك باستخدام وصف نيوتن لقوانين الجاذبية. لكن وصف نيوتن ليس سوى تقريب لقوانين الجاذبية الحقيقية التي تحكم الكون²⁸. وهو تقريب ممتاز بعيدًا عن الأفق، ولكنه سيئ بالقرب منه. الأدق هو وصف النسبية العامة لأينشتاين؛ فهو يتوافق في دقة هائلة مع قوانين الجاذبية الحقيقية بالقرب من الأفق، ويتنبأ أنه عندما تقترب من الأفق، تصبح قوة الجاذبية أقوى مما توقعه نيوتن. للبقاء في مدار دائري، تحت تأثير هذه الجاذبية المعززة التي تعادلها قوة الطرد المركزي، يجب عليك تقوية قوة الطرد المركزي لديك، مما يعني أنه يجب عليك زيادة سرعتك المدارية حول الثقب الأسود: في أثناء نزولك عبر محيطات الأفق الثلاثة، يجب عليك تدوير كبسولتك حول نفسك والبدء في تشغيل محركاتك لتدفع نفسك للأمام. لأنك بدلًا من ذلك واصلت الاندفاع إلى الخلف، مما أدى إلى إبطاء حركتك، طغت الجاذبية على قوة الطرد المركزي لديك في أثناء مرورك عبر محيطات الأفق الثلاثة، ودفعتك إلى الداخل».

«اللعة عليك يا داوون!»، أنت تشتغلين مع نفسك. تمكرين عليّ؟

«إنك تجيبين دائماً عن أسئلتي، لكنك لا تتطوعين أبداً بتقديم المعلومات المهمة. إنك لا تحذرينني أبداً عندما أخطئ!».

أنت تعرف السبب بالطبع. ستفقد الحياة البشرية بريقها وثرأها إذا سُمح لأجهزة الحاسوب بإصدار تحذير عند ارتكاب أي خطأ. بالعودة إلى عام 2032، أصدر المجلس العالمي قانوناً يقضي بضرورة تضمين إقفال هوبسون والذي يمنع مثل هذه التحذيرات في جميع أجهزة الحاسوب. مهما كان لديها الرغبة في مساعدتك، لا تستطيع داوون تجاوز إقفال هوبسون الخاص بها.

لقمع سخطك، تقوم بتدوير الكبسولة الخاصة بك وتبدأ تسلسلاً دقيقاً لتشغيل محرركاتك في الاتجاه الأمامي، ثم تتخذ مداراً حلزونياً داخلياً، ثم تبدأ بالتشاطو، ثم تشغل محرركاتك بالاتجاه الأمامي، ثم تتخذ مداراً حلزونياً داخلياً، ثم تبدأ بالتشاطو مرة أخرى، ثم تشغل محرركاتك بالاتجاه الأمامي، ثم تتخذ مداراً حلزونياً داخلياً من جديد، ثم تبدأ بالتشاطو للمرة الأخيرة، وهكذا تقودك تلك المناورة عبر 3 محيطات أفق من 2.5 إلى 2.0 إلى 1.6 إلى 1.55 إلى 1.51 إلى 1.505 إلى 1.501 إلى ... يا له من إحباط! كلما زاد عدد المرات التي تشغل فيها محرركاتك، وكانت حركتك الدائرية الناتجة أسرع، أصبح مدارك أصغر، ولكن عندما تقترب سرعتك من سرعة الضوء، يقترب مدارك من 1.5 قدر محيط الأفق فقط. وبما أنك لا تستطيع التحرك بسرعة أكبر من الضوء، فليس هناك أمل في الاقتراب من الأفق نفسه بهذه الطريقة.

مرة أخرى نطلب المساعدة من داوون، ومرة أخرى تهدئك وتشرح لك: داخل محيط 1.5 قدر محيط الأفق لا توجد مدارات دائرية على الإطلاق. إن سحب الجاذبية هناك قوي جداً بحيث لا يمكن مواجهته بواسطة أي قوى طرد مركزي، ولا حتى لو كانت إحدى القوى تُشاطي حول الثقب بسرعة الضوء. إذا كنت تريد الاقتراب، كما تقول داوون، يجب عليك التخلي عن مدار التشاطو الدائري، وبدلاً من ذلك، الهبوط مباشرة نحو الأفق، مع انطلاق محرركاتك نحو الأسفل لمنعك من السقوط بشكل كارثي. ستدعمك قوة صواريخ محركاتك ضد جاذبية الثقب في أثناء نزولك ببطء ثم تحوم فوق الأفق مباشرة، مثل رائد فضاء يحوم على صواريخ متفجرة فوق سطح القمر مباشرة.

بعد أن تعلمت بعض الحذر الآن، تطلب من داون النصيحة بشأن عواقب مثل هذا الانفجار الصاروخي القوي والمستقر. لقد أوضحت أنك ترغب في التحليق في موقع يبلغ 1.0001 قدر محيط الأفق، حيث يمكن تجربة معظم تأثيرات الأفق، ولكن يمكنك في نفس الوقت الهروب منه. إذا دعمت كبسولتك هناك بانفجار صاروخي ثابت، فما مقدار قوة عجلة الجاذبية التي سأشعر بها؟ أجابت داون بلطف: «مائة وخمسون مليوناً قدر الجاذبية الأرضية».

ستشعر بالإحباط الشديد، ستشغل محركاتك وتعود إلى بطن المركبة الفضائية. بعد نوم طويل، يتبعه خمس ساعات من الحسابات باستخدام معادلات الثقب الأسود الخاصة بالنسبية العامة، وثلاث ساعات من البحث في أطلس شيشتر للثقوب السوداء، وساعة من التشاور مع طاقمك، يمكنك صياغة خطة للمرحلة التالية من رحلتك. ينقل طاقمك بعد ذلك إلى الجمعية الجغرافية العالمية، في ظل الافتراض المتفائل بأنها لا تزال موجودة، سرّداً لتجاربك مع ساجيتاريو. في نهاية الإرسال، يصف طاقمك خطتك:

تُظهر حساباتك أنه كلما كان الثقب أكبر، كان دفع المحركات الصاروخية أضعف، وسوف تحتاج إلى دعم ذاتك، وتحوم عند 1.0001 قدر محيط الأفق للحصول على انفجار مؤلم ولكن محتمل بقوة 10 قدر الجاذبية الأرضية، يجب أن تبلغ كتلة الثقب 15 تريليون ($10^{12} \times 15$) قدر كتلة شمسية. أقرب ثقب على هذه الشاكلة هو الذي يُسمى العملاق/ جارجانتوا، وهو يقع بعيداً في حدود 100.000 سنة ضوئية عن مجرتنا درب التبانة، وبعيداً عن عنقود مجرات العذراء الذي يبلغ طوله 100 مليون سنة ضوئية، والذي تدور في مداراته مجرتنا درب التبانة. في الواقع، فهو قريب من النجم الزائف 3C273، على بُعد ملياري ($10^9 \times 2$) سنة ضوئية من مجرة درب التبانة وعلى بُعد 10٪ من حافة الكون المرئي (في وقت كتابة الكتاب).

الخطة، كما أوضحها طاقمك في بثهم، هي رحلة إلى جارجانتوا. باستخدام التسارع المعتاد 1g للنصف الأول من الرحلة والتباطؤ 1g للنصف الثاني، ستطلب الرحلة ملياري سنة بالمقاييس الأرضية، ولكن بفضل اعوجاج الزمن الناجم عن السرعة، ستطلب 42 سنة فقط بمقاييس سفيتتك الفضائية. إذا لم يكن أعضاء الجمعية الجغرافية العالمية على

استعداد للمخاطرة بالدخول في حالة سبات متجمد لمدة 4 مليارات سنة (ملياري سنة حتى تصل السفينة الفضائية إلى جارجاتنوا وملياري سنة حتى يعود إرسالك إلى الأرض)، فليس عليهم من سبيل غير فقدان الأمل في تلقي إرسالك المقبل.

جارجاتنوا

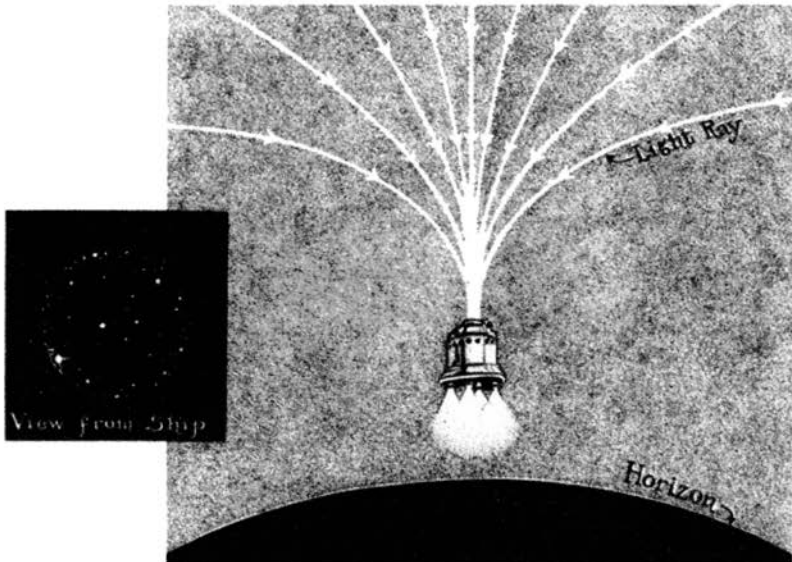
بعد مرور اثنين وأربعين عامًا بمقاييس السفينة الفضائية، تتباطأ سفيتك في المنطقة المجاورة لجارجاتنوا. في الأعلى، ترى النجم الزائف 3C273، مع تدفقين نفائين لونهما أزرق لامع ينطلقان من مركزه²⁹؛ وفي الأسفل سترى الثقب الأسود الهائل جارجاتنوا. عند الهبوط في مدار حول جارجاتنوا وإجراء قياساتك المعتادة، فإنك تؤكد أن كتلته تبلغ بالفعل 15 تريليون مرة كتلة الشمس، وترى أنه يدور ببطء شديد، وتحسب من هذه البيانات أن محيط أفقه يبلغ 29 سنة ضوئية. هنا، أخيرًا، يوجد ثقب يمكنك استكشاف محيطه في أثناء تجربة قوى المد والجزر الصغيرة وتسارع محركاتك الصاروخية! إن سلامتك في أثناء الاستكشاف مضمونة جدًا لدرجة أنك تقرر استخدام السفينة الفضائية بأكملها بدلًا من مجرد كبسولة.

ومع ذلك، قبل البدء في الهبوط، عليك أن تأمر طاقمك بتصوير النجم الزائف العملاق الموجود فوقك، وتريليونات النجوم التي تدور حول جارجاتنوا، ومليارات المجرات المنتشرة بالأعلى في السماء. كما يقومون أيضًا بتصوير قرص جارجاتنوا الأسود الموجود أسفلك؛ فهو بحجم الشمس تقريبًا كما ترى من الأرض. للوهلة الأولى يبدو أنه يحجب الضوء من جميع النجوم والمجرات الموجودة خلف الثقب. لكن بالنظر عن كثب، اكتشف طاقمك أن مجال جاذبية الثقب بمثابة عدسة³⁰ تسبب في انحراف بعض من ضوء النجوم وضوء المجرة حول حافة الأفق وتركزه في حلقة رفيعة ومشرقة على حافة القرص الأسود. هناك، في تلك الحلقة، ترى عدة صور لكل نجم محجوب: صورة واحدة تنتجها أشعة الضوء التي انحرفت حول الطرف الأيسر من الثقب، وأخرى بواسطة الأشعة التي انحرفت حول الطرف الأيمن، وثالثة بواسطة الأشعة التي سحبتها جاذبية الثقب في مدار كامل حول أحد الأطراف ثم أطلقتها باتجاهك، ورابعة بواسطة الأشعة التي دارت حول الثقب مرتين، وهكذا. والنتيجة هي بنية حلقية معقدة للغاية، والتي يقوم

طاقمك بتصويرها بتفصيل كبير لدراستها في المستقبل.

اكتملت جلسة التصوير الفوتوجرافي، وأمرت كاريس ببدء هبوط السفينة الفضائية. ولكن يجب عليك التحلي بالصبر. إن الثقب ضخم جدًا لدرجة أنه، مع تسارعك ثم تباطؤك عند 1 g ، سيتطلب الأمر 13 عامًا من زمن السفينة الفضائية للوصول إلى هدفك وهو 1.0001 من قيمة محيط أفق!

في أثناء نزول السفينة، يقوم طاقمك بعمل سجل فوتوجرافي للتغيرات في مظهر السماء حول السفينة الفضائية. اللافت للانتباه هو التغير في القرص الأسود للثقب الموجود أسفل السفينة: فهو ينمو تدريجيًا بشكل أكبر. تتوقع أن يتوقف عن النمو عندما يغطي السماء بأكملها تحتك مثل سجادة سوداء عملاقة، تاركًا السماء فوقك صافية كما هي على الأرض. لكن لا؛ يستمر القرص الأسود في النمو، ويتأرجح حول جوانب السفينة الفضائية الخاصة بك ليغطي كل شيء باستثناء فتحة دائرية لامعة في الأعلى، وهي فتحة ترى من خلالها الكون الخارجي (الشكل ص 4). يبدو الأمر كما لو أنك دخلت كهفًا وغصت في عمقه، بينما تشاهد فم الكهف المشرق يصغر تدريجيًا كلما تعمقت أكثر. في حالة من الذعر المتزايد، تناشد مساعدة داون: «هل أخطأت كاريس في تقدير مسارنا؟ هل غرقنا في أفق الثقب؟ هل نحن هالكون؟!»



ص4: السفينة الفضائية التي تحوم فوق أفق الثقب الأسود، والمسارات التي ينتقل إليها الضوء من المجرات البعيدة (الأشعة الضوئية). تعمل جاذبية الثقب على تحويل أشعة الضوء إلى الأسفل «تأثير عدسة الجاذبية»، مما يجعل البشر على متن السفينة الفضائية يرون كل الضوء متمرّكاً في بقعة دائرية مشرقة فوق رؤوسهم.

«تيخي، تيخي»، تجيب بهدوء، «نحن بمأمن؛ ما زلنا خارج الأفق. لقد غطى الظلام معظم السماء فقط بسبب تأثير العدسة القوي لجاذبية الثقب. انظر هناك، حيث يوجد مؤشري، فوق رأسي تقريباً؛ هذه هي المجرة 3C295. قبل أن تبدأ غوصك في منطقتك الحالية، كانت في وضع أفقي، بزاوية 90 درجة عن القمة. ولكن هنا بالقرب من أفق جار جانتوا، تسحب جاذبية الثقب بقوة أشعة الضوء القادمة من 3C295، مما يؤدي إلى ثنيها من الوضع الأفقي إلى الوضع العمودي تقريباً. ونتيجة لذلك، يبدو أن 3C295 موجود فوقنا بالأعلى تقريباً».

مطمئناً ستواصل الهبوط. تعرض وحدة التحكم تقدم سفيتك من حيث المسافة العمودية (نصف القطر) (للأسفل) المقطوعة ومحيط الدائرة حول الثقب الذي يمر عبره موقعك. في المراحل الأولى من نزولك، مقابل كل كيلومتر من المسافة القطرية المقطوعة، ينخفض محيطك بمقدار 6.283185307 كيلومترات.

كانت نسبة انخفاض المحيط إلى انخفاض نصف القطر 6.283185307 كيلومترات/ 1 كيلومتر؛ أي ما يعادل 21 t، تماماً كما تنتبأ صيغة إقليدس القياسية للدوائر. لكن الآن، مع اقتراب سفيتك من الأفق، أصبحت نسبة انخفاض المحيط إلى انخفاض نصف القطر أقل بكثير من 21 t:

إنها 5.960752960 عند 10 قدر قيمة طول محيط الأفق،

4.442882938 عند 2 قدر قيمة محيط الأفق،

1.894451650 عند 1.1 قدر قيمة محيط الأفق،

0.625200306 عند 1.01 قدر قيمة محيط الأفق.

مثل هذه الاختلافات عن الهندسة الإقليدية القياسية التي يتعلمها المراهقون في المدرسة لا يمكن تحقيقها إلا في الفضاء/ المكان المنحني؛ أنت ترى أن الانحناء الذي تنبأت به نظرية النسبية العامة لأينشتاين يجب أن تصاحبه قوة للمد والجزر بفعل جاذبية الثقب³¹.

في المرحلة الأخيرة من هبوط سفينتك، تطلق كارييس المحرك الصاروخي بقوة أكبر لإبطاء السقوط. أخيرًا، وصلت السفينة إلى الاستقرار عند محيط الأفق 1.0001، حيث انطلقت بتسارع قدره 10g لتصمد في مواجهة قوة سحب الجاذبية القوية للثقب. في آخر كيلومتر واحد من السفر القطري، يتناقص المحيط بمقدار 0.062828712 كيلومترًا فقط.

يكافح طاقمك لتحريك أيديهم تحت تأثير عجلة الجاذبية بقوة 10g المؤلمة، ويوجهون كاميراتهم التلسكوبية إلى جلسة تصوير طويلة ومفصلة. باستثناء خصلات من الإشعاع الضعيف من حولك الناتج عن الغاز المسخن بفعل الاصطدام، فإن الموجات الكهرومغناطيسية الوحيدة التي يمكن تصويرها هي تلك الموجودة في البقعة المضئة فوق. البقعة صغيرة، يبلغ قطرها 3 درجات قوسية فقط؛ أي ستة أضعاف حجم الشمس كما تشاهدها من الأرض. لكن توجد في تلك البقعة صور لجميع النجوم التي تدور حول جارجانتوا، وجميع المجرات في الكون. في المركز الدقيق توجد المجرات العلوية. خمسة وخمسون بالمائة من المسافة بين مركز البقعة إلى حافتها عبارة عن صور لمجرات مثل 3C295، والتي لولا تأثير عدسة الثقب، لكانت في أوضاع أفقية، على بُعد 90 درجة من القمة. خمسة وثلاثون بالمائة من المسافة بين حافة البقعة عبارة عن صور لمجرات تعرف أنها موجودة بالفعل على الجانب الآخر من الثقب، أسفلك مباشرة. وفي الثلاثين بالمائة الأبعد من البقعة توجد صورة ثانية لكل مجرة؛ وفي الـ 2 بالمائة الأبعد صورة ثالثة! ومن الغريب بنفس القدر أن ألوان جميع النجوم والمجرات غير صحيحة. المجرة التي تعرف أنها خضراء في الحقيقة تبدو وكأنها تتألق بأشعة سينية ناعمة: جاذبية جارجانتوا، في سحب إشعاع المجرة إلى الأسفل نحوك، جعل الإشعاع أكثر نشاطًا عن طريق تقليل الطول الموجي من 5×10^{-7} متر (أخضر) إلى 5×10^{-9} (أشعة سينية). وبالمثل، فإن القرص الخارجي للنجم الزائف 3C273، والذي تعلم أنه يصدر أشعة تحت الحمراء بطول موجي 5×10^{-5} متر، يبدو الآن أنه يشرق بضوء أخضر 5×10^{-7} متر.

بعد تسجيل تفاصيل النقطة العلوية بدقة، توجّه انتباهك إلى الجزء الداخلي من السفينة الفضائية. تتوقع إلى حد ما أن هنا بالقرب من أفق الثقب ستتغير قوانين الفيزياء بطريقة ما، وستؤثر هذه التغييرات على وظائفك الحيوية. لكن لا. تنظر إلى رفيقتك الأولى، كارييس؛ تبدو طبيعية. تنظر إلى رفيقك الثاني، بریت؛ يبدو طبيعيًا. يتلمس بعضكم بعضًا. تشعر أنك

طبيعي. تشرب كوبًا من الماء؛ وبصرف النظر عن تأثيرات التسارع بمقدار 10-g ، فإن الماء ينخفض بشكل طبيعي. تشغل كارييس ليزر الأرجون أيون، إنها تنتج نفس الضوء الأخضر اللامع كما كانت دائمًا. يشغل بریت ليزر ياقوتي ثم يوقفه، ويقيس الزمن الذي يستغرقه نبض الضوء للانتقال من الليزر إلى المرآة والعودة؛ ومن قياسه يحسب سرعة انتقال الضوء. والنتيجة هي نفسها تمامًا كما في المختبر الأرضي: 299792 كيلومترًا في الثانية.

كل شيء في السفينة الفضائية طبيعي، تمامًا كما لو كانت السفينة تستقر على سطح كوكب ضخّم تبلغ جاذبيته 10g . إذا لم تنظر خارج السفينة الفضائية وترى البقعة الغربية فوقك والسواد الغامر في كل مكان، فلن تعرف أنك قريب جدًا من أفق الثقب الأسود بدلًا من أن تكون آمنًا على سطح الكوكب، أو تكاد لا تعرفه. لا أدري. يؤدي الثقب إلى انحناء الزمكان داخل السفينة الفضائية وكذلك خارجها، وباستخدام أدوات دقيقة بشكل كافٍ، يمكنك اكتشاف الانحناء؛ على سبيل المثال، من خلال تأثير المد والجزر على ما بين رأسك وقدميك. ولكن في حين أن الانحناء مهم للغاية على نطاق محيط الأفق الذي يبلغ 300 تريليون كيلومتر، فإن آثاره ضئيلة على نطاق السفينة الفضائية التي يبلغ طولها كيلومترًا واحدًا؛ تبلغ قوة المد والجزر الناتجة عن الانحناء بين أحد طرفي السفينة الفضائية والطرف الآخر جزءًا من مائة من تريليون من جاذبية الأرض (10^{-14} g)، وبين رأسك وقدميك أصغر من ذلك بألف مرة!

لمتابعة هذه الحالة الطبيعية الرائعة بشكل أكبر، يُسقط بریت من السفينة الفضائية كبسولة تحتوي على أداة ليزر ومرآة لقياس سرعة الضوء. وبينما تغوص الكبسولة نحو الأفق، يقيس الجهاز السرعة التي تنتقل بها نبضات الضوء من الليزر الموجود في أنف الكبسولة إلى المرآة الموجودة في ذيلها وظهرها. ينقل الحاسوب الموجود في الكبسولة النتيجة على شعاع ليزر إلى السفينة: « 299792 كيلومترًا في الثانية؛ 299792 ؛ 299792 ...». يتغير لون شعاع الليزر الوارد من الأخضر إلى الأحمر إلى الأشعة تحت الحمراء إلى الموجات الميكروية إلى الراديو مع اقتراب الكبسولة من الأفق، ولا تزال الرسالة هي نفسها: « 299792 ؛ 299792 ؛ 299792 ...» ثم يختفي شعاع الليزر. لقد اخترقت الكبسولة الأفق، ولم يحدث أي تغيير في سرعة الضوء بداخلها مرة واحدة في أثناء سقوطها، كما لم يحدث أي تغيير في قوانين الفيزياء التي تحكم عمل الأنظمة الإلكترونية للكبسولة.

هذه النتائج التجريبية ترضيك كثيرًا. في أوائل القرن العشرين، أعلن ألبرت أينشتاين، لأسباب فلسفية إلى حد كبير، أن القوانين المحلية للفيزياء (القوانين الموجودة في مناطق صغيرة بالقدر الكافي بحيث يمكن للمرء أن يتجاهل انحناء الزمكان) يجب أن تكون هي نفسها في كل مكان في الكون. لقد قدم هذا الإعلان باعتباره مبدأً أساسيًا في الفيزياء، وهو مبدأ التكافؤ³². في القرون التالية غالبًا ما كان مبدأ التكافؤ يخضع للاختبار التجريبي، ولكن لم يُختبر بيانًا وشاملاً كما هي الحال في تجاربك هنا بالقرب من أفق جارجانتوا.

لقد سئمت أنت وطاقمك الآن من الصراع مع الجاذبية التي تبلغ قيمتها عشرة أمثال الجاذبية الأرضية، لذا تستعد للمرحلة التالية والأخيرة من رحلتك، وهي العودة إلى مجرتنا درب التبانة. سيرسل طاقمك تقريرًا عن استكشافات جارجانتوا خلال المراحل الأولى من الرحلة؛ وبما أن مركبتك الفضائية نفسها ستسافر قريبًا بسرعة تقارب سرعة الضوء؛ ستصل عمليات الإرسال إلى درب التبانة قبل أقل من عام من وصول السفينة، كما بالمقاييس على الأرض.

عندما تبتعد سفينتك الفضائية عن جارجانتوا، يُجري طاقمك دراسة تلسكوبية دقيقة للنجم الزائف 3C273 الموجود فوق رأسك³³ (الشكل ص 5).

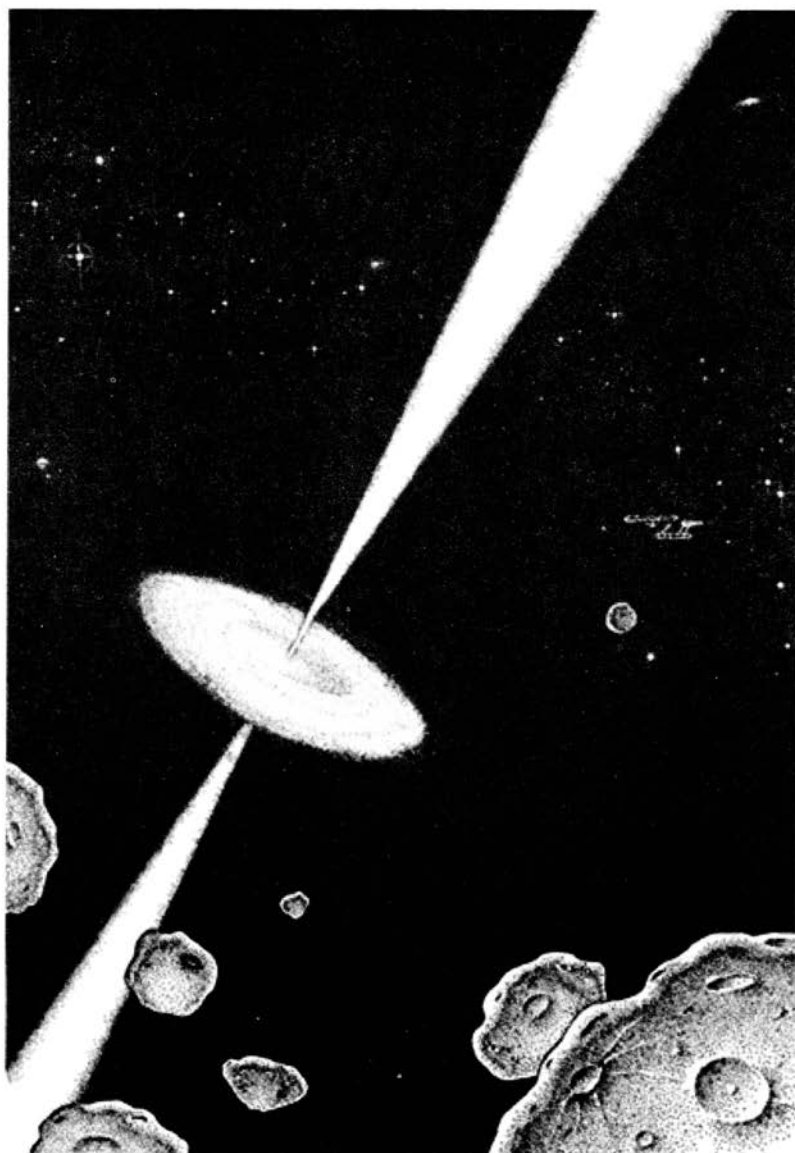
إن تدفقاتها النفائنة هائلة -وهي عبارة عن نتوءات رقيقة من الغاز الساخن تنطلق من قلب النجم الزائف: يبلغ طولها 3 ملايين سنة ضوئية. من خلال توجيه التلسكوبات الخاصة بك على القلب، يرى طاقمك مصدر قوة التدفقات النفائنة: كتلة سميكة وساخنة من الغاز يقل حجمها عن سنة ضوئية واحدة، مع وجود ثقب أسود في مركزها. تأخذ الدونات -التي أطلق عليها علماء الفيزياء الفلكية اسم «القرص التراكمي»- مدارًا حول الثقب الأسود وتدور حوله. من خلال قياس فترة دورانها ومحيطها، يستنتج طاقمك كتلة الثقب: ملياران (2×10^9) قدر كتلة شمسية؛ أي أصغر بـ 7500 مرة من جارجانتوا، ولكنه أكبر بكثير من أي ثقب في درب التبانة. يتدفق تيار من الغاز من كعكة الدونات إلى الأفق، تسحبه جاذبية الثقب. ومع اقترابه من الأفق، يدور التيار -بطريقة لم تشاهدها من قبل - حول الثقب ويستمر في الدوران في حركة تشبه حركة الإعصار. لا بد أن هذا الثقب يلف محوريًا بسرعة! من السهل تحديد محور الدوران؛ وهو المحور الذي يدور حوله تيار الغاز. لاحظت أن تدفقين من النفائات ينطلقان على طول محور الدوران. ويولدان فوق القطبين الشمالي والجنوبي للأفق مباشرة، حيث تمتص الطاقة من دوران الثقب ومن

الكعكة الدونات³⁴، مثلما يمتص الإعصار الغبار من الأرض.

التناقض بين جارجانتوا و3C273 مذهل: لماذا لا يمتلك جارجانتوا، بكتلته وحجمه الأكبر بـ1000 مرة، كعكة دونات دائرية من الغاز وتدفقات نفاثات النجوم الزائفة العملاقة؟ يخبرك بریت، بعد دراسة تلسكوبية طويلة، بالإجابة: مرة كل بضعة أشهر، يبتعد نجم يدور حول الثقب الأصفر في 3C273 بالقرب من الأفق ويتمزق بفعل قوة المد والجزر للثقب. تقذف أحشاء النجم، والتي تبلغ قيمتها ما يقرب من كتلة شمسية واحدة من الغاز، وتتناثر حول الثقب. يؤدي الاحتكاك الداخلي تدريجيًا إلى دفع الغاز المتناثر إلى داخل الكعكة. يعوض هذا الغاز الطازج الغاز الذي تغذيه الدونات باستمرار في الثقب وتدفقات النفاثات. وبالتالي يحتفظ بالدونات وتدفقات النفاثات مليئة بالغاز، وتستمر في التآلق بشكل مشرق.

يوضح بریت أن النجوم تبتعد أيضًا بالقرب من جارجانتوا. ولكن نظرًا لأن جارجانتوا أكبر بكثير من 3C273، فإن قوة المد والجزر خارج أفقه أضعف من أن تمزق أي نجم. يبتلع جارجانتوا النجوم كاملة من دون أن يقذف أحشاءها في كعكة دونات حول محيطه. ومع عدم وجود كعكة الدونات، ليس لدى جارجانتوا أي وسيلة لإنتاج تدفقات نفاثة أو غيرها من أعمال العنف للنجم الزائف.

مع استمرار سفيتتك الفضائية في الخروج من قبضة جاذبية جارجانتوا، عليك وضع خطط لرحلة العودة إلى المنزل. بحلول الوقت الذي تصل فيه سفيتتك إلى مجرة درب التبانة، ستكون الأرض أكبر بـ4 مليارات سنة مما كانت عليه عندما غادرت. ستكون التغييرات في المجتمع البشري هائلة جدًا لدرجة أنك لا ترغب في العودة إليها. بدلًا من ذلك، قررت أنت وطاقتك استعمار الفضاء المحيط بثقب أسود دوار. أنت تعلم أنه مثلما تساعد طاقة الدوران للثقب الموجود في 3C273 على تشغيل تدفقات نفاثات النجوم الزائفة، كذلك يمكن استخدام طاقة الدوران للثقب الأصفر كمصدر للطاقة للحضارة الإنسانية.



ص 5: النجم الزائف 3C273: ثقب أسود كتلته مليارا كتلة شمسية، محاط بكتلة من الغاز («القرص التراكمي»)، وتدفقان نفائان عملاقان ينطلقان على طول محور دوران الثقب.

أنت لا تريد أن تصل إلى ثقب مختار وتكتشف أن كائنات أخرى قد بنّت بالفعل حضارة حوله، لذا بدلًا من توجيه سفينتك الفضائية نحو ثقب سريع الدوران موجود بالفعل، فإنك

تستهدف نظامًا نجميًا سيؤدي إلى إنشاء ثقب سريع الدوران بعد وقت قصير من وصول سفيتك.

في سديم أوريون/ الجبار في درب التبانة، في الوقت الذي غادرت فيه الأرض، كان هناك نظام نجمي ثنائي يتكون من نجمين، كل منهما 30 كتلة شمسية، يدور أحدهما حول الآخر. حسب داون أن كلاً من تلك النجوم يجب أن ينفجر داخليًا - في أثناء توجهك إلى جارجانتوا - ليشكل ثقبًا غير دوار تبلغ كتلته 24 كتلة شمسية (مع 6 كتل شمسية من الغاز المنبعث في أثناء الانفجار الداخلي). يجب أن يدور هذان الثقبان اللذان تبلغ كتلتهما 24 كتلة شمسية أحدهما حول الآخر كثقب أسود ثنائي، وفي أثناء دورانهما، يجب أن يصدرًا موجات من قوة المد والجزر (تموجات من «انحناء الزمكان») تسمى موجات الجاذبية 35. الموجات الجاذبية هذه يجب أن تضغط على الثنائي بنفس الطريقة التي تدفع بها الرصاصة المنطلقة البندقية التي تطلقها، ويجب أن يدفع ارتداد موجة الجاذبية الثقوب إلى دوامة داخلية بطيئة ولكن لا رحمة فيها.

مع تعديل بسيط لتسارع مركبتك الفضائية، يمكنك توقيت وصولك ليتزامن مع المرحلة الأخيرة من تلك الدوامة الداخلية: بعد عدة أيام من وصولك، ستشاهد آفاق الثقوب غير الدوارة تدور بعضها حول بعض، أقرب وأقرب، وأسرع فأسرع، حتى تتحد لتنتج أفقًا واحدًا أكبر يدور ويدور.

نظرًا لأن الثقبين الأصليين لا يلفان محوريًا، فلا يمكن لأي منهما بمفرده أن يكون بمثابة مصدر طاقة فعال لمستعمرتك. ومع ذلك، فإن الثقب المولود الجديد الذي يلف محوريًا بسرعة سيكون مثاليًا!

الوطن

بعد رحلة استغرقت 42 عامًا، تباطأت سفيتك الفضائية أخيرًا في سديم أوريون، حيث تنبأت داون بوجود الثقبين. ها هما، عند العلامة مباشرة! ومن خلال قياس الحركة المدارية للذرات بين -النجوم في أثناء سقوطها في الثقبين، يمكنك التحقق من أن آفاقهما لا يدوران وأن كلاً منهما يزن 24 كتلة شمسية، تمامًا كما توقعت داون. يبلغ محيط كل أفق 440 كيلومترًا؛ ويفصل بينهما 30 ألف كيلومتر. ويدور أحدهما حول الآخر مرة كل

13 ثانية. وبإدخال هذه الأرقام في الصيغ الرياضية لمعادلات النسبية العامة اعتمادًا على ارتداد موجة الجاذبية، نستنتج أن الثقبين يجب أن يندمجا بعد سبعة أيام من الآن. هناك ما يكفي من الوقت لطاقمك لإعداد كاميراتهم التلسكوبية وتسجيل التفاصيل. ومن خلال تصوير الحلقة الساطعة من ضوء النجوم المركز الذي يحيط بالقرص الأسود لكل ثقب، يمكنهم بسهولة مراقبة حركات الثقوب.

أنت تريد أن تكون قريبًا بدرجة كافية لتتمكن من الرؤية بوضوح، ولكن بعيدًا بما يكفي لتكون آمنًا من قوى المد والجزر الموجودة في الثقوب. إن الموقع الجيد، كما تقرر، هو مدار مركبة فضائية أكبر بعشر مرات من المدار الذي تدور فيه الثقوب بعضها حول بعض - قطر مداري يبلغ 300 ألف كيلومتر ومحيط مداري يبلغ 940 ألف كيلومتر. تقوم كاريس بمناوره السفينة الفضائية في ذلك المدار، ويبدأ طاقمك بتجميع الملاحظات الرصدية باستخدام التلسكوبات وباستخدام التصوير الفوتوغرافي. وعلى مدار الأيام الستة التالية، يقترب الثقبان تدريجيًا أحدهما من الآخر فيسرعان من حركتهما المدارية.

قبل يوم واحد من الاندماج، تنكمش المسافة بينهما من 30 ألفًا إلى 18 ألف كيلومتر، وتنخفض الفترة المدارية لهما من 13 إلى 6.3 ثانية.

قبل ساعة واحدة من الاندماج، ستفصل بينهما مسافة 8400 كيلومتر، وفترة مدارهما 1.9 ثانية.

دقيقة واحدة قبل الاندماج: يفصل بينهما 3000 كيلومتر، المدة 0.41 ثانية.

عشر ثوانٍ قبل الاندماج: الفاصل 1900 كيلومتر، المدة 0.21 ثانية.

ثم، في الثواني العشر الأخيرة، تبدأ أنت وسفintك الفضائية في الاهتزاز، بلطف في البداية، ثم بشكل أعنف. يبدو الأمر كما لو أن يدين عملاقين أمسكتا برأسك وقدميك، وكانتا تضغطان عليك وتمددانك بقوة متنامية وسرعة متزايدة. وبعد ذلك، وفي مفاجأة أكبر من مفاجأة البدء، يتوقف الاهتزاز. كل شيء هادئ.

«ما هذا؟»، تنذمر لداون ويرتعش صوتك.

«تيخي، تيخي»، تجيب بهدوء.

«كانت تلك هي قوة المد والجزر المتموجة لموجات الجاذبية الناتجة عن اندماج

الثقيبين. لقد اعتدت على موجات الجاذبية الضعيفة جدًا، بحيث لا يمكن اكتشاف قوة المد والجزر إلا بواسطة أدوات دقيقة جدًا. ومع ذلك، هنا بالقرب من الثقوب المندمجة، فإنها قوية للغاية، قوية جدًا بحيث إننا لو أوقفنا سفيتنا الفضائية في مدار أصغر بثلاثين مرة لمزقنا الأمواج. ولكننا الآن آمنون. اكتمل الاندماج وذهبت الأمواج. إنها في الطريق إلى أعماق الكون، حاملة إلى علماء الفلك في أنحائه قصيدًا سيمفونيًا للاندماج»³⁶.

عند تحريك أحد تلسكوبات طاقمك على مصدر الجاذبية بالأسفل، ترى أن داون على حق، وأن الاندماج قد اكتمل. فحيثما كان هناك ثقبان في السابق، أصبحا الآن ثقبًا واحدًا فقط، وهو يدور بسرعة، كما يظهر من دوامة الذرات المتساقطة. سيكون هذا الثقب بمثابة مولد طاقة مثالي لطاقمك ولآلاف الأجيال من أحفادكم.

ومن خلال قياس مدار السفينة الفضائية، تستنتج كاريس أن الثقب يزن 45 كتلة شمسية. وبما أن الثقوب الأم تبلغ 48 كتلة شمسية، فلا بد أن 3 كتل شمسية قد تحولت إلى طاقة نقية وحملتها موجات الجاذبية. لا عجب أن الأمواج قد هزتك بشدة!

في أثناء توجيه التلسكوبات الخاصة بك نحو الثقب، يندفع جسم صغير بشكل غير متوقع عبر مركبتك الفضائية، ويطلق شرارات لامعة بغزارة في كل الاتجاهات، ثم ينفجر محدثًا فجوة كبيرة في جانب سفيتك. يهرع طاقمك وروبوتاتك المدربون تدريبًا جيدًا إلى مواقع القتال الخاصة بهم، وتبحث عبثًا عن السفينة الحربية المهاجمة -وبعد ذلك، استجابة لنداء مساعدتها، تعلن داون بهدوء عبر نظام مكبرات الصوت الخاص بالسفينة: «تيخي، تيخي؛ نحن لا نتعرض للهجوم. لقد كان ذلك مجرد ثقب أسود بدائي غريب، تبخر ثم انفجر».

«ماذا؟!»، هكذا ستصرخ.

«ثقب أسود بدائي، تبخر ثم دمر نفسه في انفجار»، تكرر داون.

«اشرحي!»، هكذا ستطلب منها.

«ماذا تقصدين بالبدائية؟ ماذا تقصدين بالتبخر والانفجار؟»

إنك تقولين كلامًا لا معنى له. قد تسقط الأشياء في الثقب الأسود، لكن لا شيء يمكن أن يخرج منه أبدًا؛ لا شيء يمكن أن «يتبخر». والثقب الأسود يعيش إلى الأبد؛ فهو ينمو دائمًا، ولا ينكمش أبدًا. من المستحيل أن ينفجر الثقب الأسود ويدمر نفسه. هذا سخف».

بصبر كما هي الحال دائماً، تقوم داوون بتثقيفك. تشرح قائلة: «إن الأجسام الكبيرة -مثل البشر والنجوم والثقوب السوداء التي تشكلت نتيجة انفجار نجم- تخضع لقوانين الفيزياء الكلاسيكية، وقوانين نيوتن للحركة، وقوانين النسبية لأينشتاين، وهلم جرّاً. على النقيض من ذلك، فإن الأجسام الصغيرة -على سبيل المثال الذرات والجزيئات والثقوب السوداء الأصغر من الذرة- تخضع لمجموعة مختلفة تماماً من القوانين، وهي القوانين الكمومية في الفيزياء. بينما تحظر القوانين الكلاسيكية أن يتبخّر أي ثقب أسود بالحجم العادي، أو يتبخّر، أو ينكمش، أو ينفجر، أو أن يدمر نفسه، فإن الحال ليست هكذا مع القوانين الكمومية. فهي تسمح بأن يتبخّر أي ثقب أسود بحجم الذرة وينكمش تدريجياً حتى يصل إلى محيط صغير للغاية، وهو نفس محيط النواة الذرية تقريباً. الثقوب التي حجمها صغير لكن تزن نحو مليار طن، لا بد أن تدمر نفسها في انفجار هائل. ويحول الانفجار كتلة الثقب البالغة مليار طن إلى طاقة متدفقة؛ وهي أقوى تريليون مرة من أقوى الانفجارات النووية التي فجرها الإنسان على الأرض في القرن العشرين. إن انفجار كهذا قد أدى الآن إلى إتلاف سفيتنا».

«لكن لا داعي للقلق من حدوث المزيد من الانفجارات»، تتابع داوون، «مثل هذه الانفجارات نادرة للغاية لأن الثقوب السوداء الصغيرة نادرة جداً. المكان الوحيد الذي نشأت فيه كل الثقوب الصغيرة كان عند ولادة كوننا من خلال الانفجار الأعظم، قبل خمسة عشر مليار سنة؛ ولهذا السبب يطلق عليها الثقوب البدائية. لم يخلق الانفجار الأعظم سوى عدد قليل من هذه الثقوب البدائية، وهذه الثقوب القليلة كانت تتبخّر وتنكمش ببطء منذ ولادتها. من حين لآخر يصل أحدها إلى حجمه الحرج الأصغر وينفجر³⁹. لقد كان من قبيل الصدفة فقط -وهو حدث غير محتمل على الإطلاق- أن انفجر أحدها في أثناء اندفاعه بالقرب من سفيتنا، واحتمال نادر للغاية أن تواجه سفيتنا الفضائية أو أي سفينة أخرى مثل هذا الثقب».

بعد شعورك بالارتياح، أمرت طاقمك ببدء إصلاحات السفينة في حين تشرع أنت ورفاقك في الدراسة التلسكوبية للثقب الذي تبلغ كتلته 45 كتلة شمسية والذي يدور بسرعة أسفلك.

إن دوران الثقب واضح ليس فقط من دوامة الذرات المتساقطة، ولكن أيضاً من شكل البقعة السوداء ذات الحلقات الساطعة التي تشكلها في السماء أسفلك: البقعة السوداء

مضغوطة، مثل البقطين؛ ينتفخ عند خط استوائه، ويفلطح عند قطبيه. إن قوة الطرد المركزي لدوران الثقب، التي تميل إلى دفع الثقب إلى الخارج، تخلق الانتفاخ والتسطيح⁴⁰. لكن الانتفاخ ليس متماثلًا؛ فهو يبدو أكبر على الحافة اليمنى من القرص، الذي يتحرك بعيدًا عنك في أثناء دوران الأفق، مقارنة بالحافة اليسرى. توضح داون أن السبب في ذلك هو أن الأفق يمكنه التقاط أشعة ضوء النجوم بسهولة أكبر إذا تحركت نحوك على طول حافته اليمنى، عكس اتجاه لفه المحوري، مقارنة بحافته اليسرى؛ أي مع اتجاه لفه المحوري.

من خلال قياس شكل البقعة ومقارنتها مع الصيغ الرياضية للثقب الأسود في النسبية العامة، يستنتج بريت أن كمية الحركة الزاوية لللف المحوري للثقب تبلغ 96٪ من الحد الأقصى المسموح به لكتلة ثقب. ومن كمية الحركة الزاوية هذه وكتلة الثقب البالغة 45 شمسًا، يمكنك حساب الخصائص الأخرى للثقب، بما في ذلك معدل اللف المحوري لأفق، وهو 270 دورة في الثانية، ومحيطه الاستوائي، 533 كيلومترًا.

إن اللف المحوري للثقب يثير اهتمامك. لم يسبق لك أن لاحظت ثقبًا يلف حول محوره عن قرب. لذلك رغم وخز ضميرك، تطلب روبوتًا متطوعًا لاستكشاف محيط الأفق ونقل تجاربه. تعطي الروبوت، واسمه كلوب، تعليمات دقيقة: «انزل إلى عشرة أمتار فوق الأفق وهناك أطلق صواريخك لتحافظ على وضعية السكون، وحُم مباشرة أسفل السفينة الفضائية. استخدم محرركاتك الصاروخية لمقاومة سحب الجاذبية الداخلي ودوامة الفضاء الشبيهة بالإعصار».

حريصًا على المغامرة، يسقط كلوب من بطن السفينة الفضائية ويهبط إلى الأسفل، ويطلق محرركاته الصاروخية بلطف في البداية، ثم بقوة أكبر، لمقاومة دوامة الفضاء والبقاء مباشرة أسفل السفينة. في البداية لم يكن لدى كلوب أي مشكلات. ولكن عندما يصل إلى محيط يبلغ 833 كيلومترًا؛ أي أكبر بنسبة 56 بالمائة من الأفق، يرسل ضوء الليزر الخاص به الرسالة التالية: «لا أستطيع مقاومة الدوامة؛ لا أستطيع مقاومة الدوامة؛ لا أستطيع مقاومة الدوامة». «لا أستطيع؛ لا أستطيع؛ لا أستطيع!». ومثل صخرة عالقة في إعصار يُجر إلى مدار دائري حول الثقب⁴¹.

«لا تقلق»، هكذا تجيب، «فقط ابذل قصارى جهدك لمقاومة الدوامة، واستمر في النزول حتى تصل إلى ارتفاع عشرة أمتار فوق الأفق».

كلوب يمثل. في أثناء نزوله، يُسحب إلى حركة دورانية سريعة تزداد سرعتها. وأخيرًا، عندما يتوقف عن الهبوط ويحوم على ارتفاع عشرة أمتار فوق الأفق، فإنه يطوق الثقب بشكل شبه مثالي يتوافق مع سرعة الأفق نفسه، بمعدل 270 دورة في الثانية. وبصرف النظر عن مدى معارضة هذا الاقتراح، فإنه لا يستطيع أن يرفض الأمر. دوامة الفضاء/ المكان لن تسمح له بالتوقف.

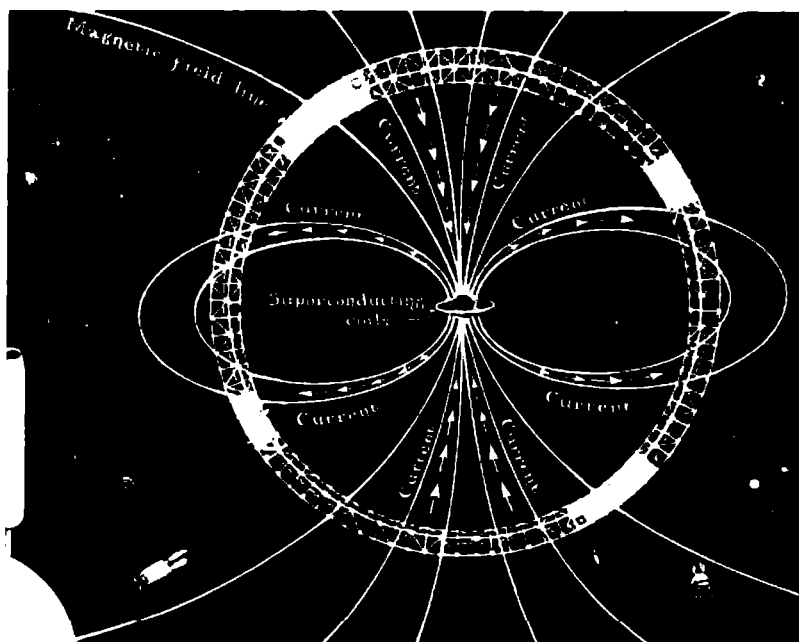
«ادفع بمحركاتك في الاتجاه الآخر»، تعطيه أمرًا، «إذا لم تتمكن من الدوران بشكل أبداً من 270 دورة في الثانية، فحاول الدوران بشكل أسرع».

يحاول كلوب. يدفع بمحركاته، محتفظاً بنفسه دائماً على ارتفاع 10 أمتار فوق الأفق محاولاً تطويقه بشكل أسرع من سرعته الحالية. وعلى الرغم من أنه يشعر بالتسارع المعتاد الناتج عن دفع محركاته، فإنك لن ترى أن حركته تتغير على الإطلاق. لا يزال يدور حول الثقب 270 مرة في الثانية. وبعد ذلك، قبل أن تتمكن من إرسال المزيد من التعليمات، ينفذ وقوده؛ يهبط إلى الأسفل؛ ينطلق ضوء الليزر الخاص به عبر الطيف الكهرومغناطيسي من الأخضر إلى الأحمر إلى الأشعة تحت الحمراء إلى موجات الراديو، ثم يتحول إلى اللون الأسود من دون أي تغيير في حركته الدائرية. لقد رحل، إلى أسفل الثقب، يندفع نحو المفردة القاسية والتي لن تراها أبداً.

بعد ثلاثة أسابيع من الحداد والتجارب والدراسات التلسكوبية، يبدأ طاقمك البناء للمستقبل. وبجلب المواد من الكواكب البعيدة، يقومون ببناء حلقة عارضة حول الثقب. يبلغ محيط الحلقة 5 ملايين كيلومتر، وسمكها 552 كيلومتراً، وعرضها 4000 كيلومتر. وتدور بمعدل مناسب تماماً، دورتان في الساعة، لتتمكن قوى الطرد المركزي من موازنة سحب جاذبية الثقب عند الطبقة المركزية من الحلقة، على بُعد 276 كيلومتراً من وجهيها الداخلي والخارجي. ستختار أبعادها بعناية بحيث يتمكن الأشخاص الذين يفضلون العيش في ظل مقدار واحد جاذبية أرضية من إقامة منازلهم بالقرب من الوجه الداخلي أو الخارجي للحلقة، في حين أن أولئك الذين يفضلون الجاذبية الأضعف يمكنهم العيش بالقرب من مركزها. ترجع هذه الاختلافات في الجاذبية جزئياً إلى قوة الطرد المركزي للحلقة الدوارة، وجزئياً إلى قوة المد والجزر للثقب، أو، بلغة أينشتاين، إلى انحناء الزمكان.

تُستخرج الطاقة الكهربائية التي تسخن وتضيء هذا العالم الدائري من الثقب الأسود: عشرون بالمائة من كتلة الثقب هي شكل من الطاقة المخزنة في دوامة تشبه الإعصار في الفضاء/ المكان الخارجي ولكن بالقرب من الأفق⁴². إنها طاقة أكبر بـ 10000 مرة مما تشعه الشمس على شكل حرارة وضوء طوال حياتها! وكونها خارج الأفق، فهذا يعني أنه يمكن استخراجها. ناهيك عن أن مستخرج الطاقة في العالم الدائري لا يتعدى كفاءته 50 بالمائة، لكن هذا يعني أنه لا يزال لديك مصدر طاقة أكبر بـ 5000 مرة من الشمس.

يعمل مستخرج الطاقة بنفس المبدأ الذي تعمل به بعض النجوم الزائفة: خلق طاقمك مجالاً مغناطيسياً ضخماً يمر عبر أفق الثقب ثم ثبت هذا المجال على الثقب عن طريق ملفات عملاقة فائقة التوصيل، على الرغم من ميله إلى الانفجار (الشكل ص 6). بينما يدور الأفق، يسحب الفضاء/ المكان القريب إلى دوامة تشبه الإعصار والتي بدورها تتفاعل مع خطوط المجال المغناطيسي لتشكل مولد طاقة كهربائية عملاقاً. تعمل خطوط المجال المغناطيسي كخطوط نقل للطاقة. يندفع التيار الكهربائي من خط استواء الثقب (على شكل تدفق للإلكترونات) ثم يصل إلى خطوط المجال المغناطيسي، والتي تنقله إلى العالم الحلقي الذي أنشأه البشر. وهكذا يخزن التيار الكهربائي قدرته. ثم يتدفق خارج العالم الحلقي على مجموعة أخرى من خطوط المجال المغناطيسي وينزل إلى القطبين الشمالي والجنوبي للثقب (على شكل تدفق للبوزيترونات). ومن خلال ضبط قوة المجال المغناطيسي، يستطيع سكان العالم ضبط إنتاج الطاقة: مجال ضعيف وقدرة منخفضة في السنوات الأولى للعالم؛ مجال قوي وقدرة عالية في السنوات اللاحقة. ومع استخلاص الطاقة تدريجياً، سيطلق الثقب دورانه، لكن الأمر سيستغرق عدة دهور لاستنفاد المخزون الهائل من طاقة الدوران الموجودة داخل الثقب.



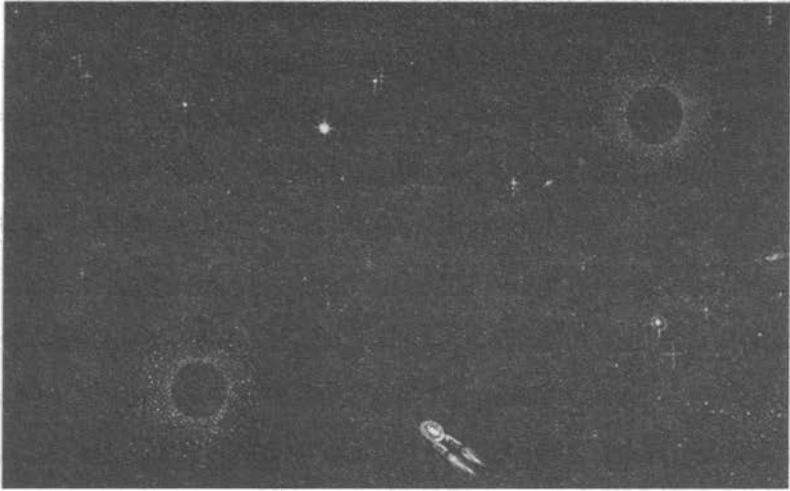
ص 6: مدينة تقع على عارضة دائرية حول ثقب أسود دوار، والنظام الكهرومغناطيسي الذي تستمد المدينة من خلاله الطاقة باستخدام دوران الثقب.

يمكن لطاقتكم وأجيال لا حصر لها من أحفادهم تسمية هذا العالم الصناعي بـ«الوطن»، واستخدامه كقاعدة للاستكشافات المستقبلية للكون. لكن لن تكون أنت من بين هؤلاء المستكشفين.

إنك تشنق إلى الأرض والأصدقاء الذين تركتهم وراءك، الأصدقاء الذين لا بد أنهم ماتوا منذ أكثر من 4 مليارات سنة. إن شوقك كبير جداً لدرجة أنك على استعداد للمخاطرة بالربع الأخير من حياتك الطبيعية البالغة 200 عام في محاولة خطيرة وربما متهورة للعودة إلى عصر شبابك المثالي.

يعد السفر عبر الزمن إلى المستقبل أمراً سهلاً نوعاً ما، كما أظهرت رحلتك بين الثقوب السوداء. لكنها لا تسافر إلى الماضي. في الواقع، قد يكون مثل هذا السفر محظوراً تماماً بموجب القوانين الأساسية للفيزياء. ومع ذلك، تخبرك داون عن تكهنات، يعود تاريخها إلى القرن العشرين، مفادها أنه يمكن تحقيق السفر عبر الزمن إلى الماضي بمساعدة

التفاف فضائي افتراضي يسمى الثقب الدودي⁴⁴. يتكون هذا الالتواء الفضائي من فئحتين كمدخلين للثقب الدودي (أفواه الثقب الدودي)، واللذان يبدوان مثل الثقوب السوداء إلى حد كبير ولكن من دون أفاق، ويمكن أن يكونا متباعدين عبر الكون (الشكل ص 7). أي شيء يدخل أحد الفمين يجد نفسه في أنبوب قصير جدًا (حلق الثقب الدودي) يؤدي إلى الفم الآخر ثم يخرج منه. لا يمكن رؤية هذا الأنبوب من كوننا لأنه يمتد عبر الفضاء/ المكان الفائق وليس عبر الفضاء/ المكان العادي. توضح داون أنه من الممكن أن يتصل الزمن عبر الثقب الدودي بطريقة مختلفة عن كوننا. من خلال عبور الثقب الدودي في اتجاه واحد، على سبيل المثال من الفم الأيسر إلى الأيمن، يمكن للمرء أن يعود إلى الماضي في زمن كوننا، في حين أن العبور في الاتجاه المعاكس، من اليمين إلى اليسار، يمكن أن يتقدم للمستقبل. مثل هذا الثقب الدودي سيكون بمثابة اعوجاج زمني، بالإضافة إلى اعوجاج مكاني/ فضائي.



ص 7: فما الثقب الدودي الافتراضي. ادخل آيًا من الفمين، وستخرج من الآخر، بعد أن تكون قد سافرت عبر أنبوب قصير (حلق الثقب الدودي) لا يمتد عبر كوننا، بل عبر الفضاء/ المكان الفائق.

تتطلب قوانين الجاذبية الكمومية وجود ثقوب دودية صغيرة للغاية من هذا النوع، حسبما تخبرك⁴⁵ داون. يجب أن تكون هذه الثقوب الدودية الكمومية صغيرة جدًا، حيث يبلغ حجمها 10^{-33} سنتيمتر، بحيث يكون وجودها عابرًا فقط، وهو قصير جدًا، 10^{-43}

ثانية، بحيث لا يمكن استخدامها للسفر عبر الزمن. إنها تظهر إلى الوجود كالوميض بطريقة عشوائية ثم تختفي ولا يمكن التنبؤ بها - هنا وهناك وفي كل مكان. في بعض الأحيان، سيكون للثقب الدودي الوامض فم واحد بالقرب من العالم الدائري اليوم، والآخر بالقرب من الأرض في العصر الذي يعود إلى 4 مليارات سنة مضت عندما بدأت رحلتك. تقترح داون محاولة الإمساك بهذا الثقب الدودي عندما يومض، وتكبيره مثل طفل ينفخ بالوناً، وإبقائه مفتوحاً لفترة كافية حتى تتمكن من السفر عبره إلى ملعب شبابك. لكن داون تحذرك من خطر كبير. لقد خمن الفيزيائيون، على الرغم من أن ذلك لم يثبت مطلقاً، أنه قبل لحظة واحدة من تحول الثقب الدودي المتوسع إلى آلة زمن، يجب أن يدمر الثقب الدودي نفسه ذاتياً باستخدام وميض هائل ومتفجر. بهذه الطريقة يمكن للكون أن يحمي نفسه من مفارقات السفر عبر الزمن، مثل عودة الرجل بالزمن إلى الوراء وقتل أمه قبل أن تحمل به، وبالتالي يمنع ولادة ذاته عن طريق قتل أمه.

إذا كان تخمين الفيزيائيين خاطئاً، فقد يكون داون قادراً على إبقاء الثقب مفتوحاً لبضع ثوانٍ، مع وجود حلق كبير بما يكفي لتتمكن من السفر عبره. من خلال الانتظار في مكان قريب من فم الثقب الدودي بينما تقوم داون بتوسيع الثقب الدودي لتغوص فيه، خلال جزء من الثانية من زمنك، ستصل إلى موطنك على الأرض، في عصر شبابك قبل 4 مليارات سنة. ولكن إذا دمرت آلة الزمن نفسها بنفسها، فسوف تدمرك معها. ستقرر أن تغتحم الفرصة...

الحكاية المذكورة أعلاه تبدو وكأنها خيال علمي. في الواقع، جزء منها بالفعل خيال علمي: لا أستطيع بأي حال من الأحوال أن أضمن وجود ثقب أسود كتلته 10 أمثال كتلة شمسية بالقرب من النجم فيجا، أو ثقب كتلته مليون كتلة شمسية في مركز درب التبانة، أو ثقب أسود كتلته 15 تريليون كتلة شمسية في أي مكان على الإطلاق في الكون؛ كلها خيال تأملي ولكنه منطقي. ولا أستطيع أن أضمن نجاح البشر في تطوير التكنولوجيا اللازمة للسفر بين المجرات، أو حتى السفر بين النجوم، أو بناء عوالم حلقية على هياكل حول الثقوب السوداء. هذه أيضاً خيالات تأملية.

من ناحية أخرى، يمكنني أن أضمن بثقة كبيرة ولكن ليست كاملة أن الثقوب السوداء موجودة في كوننا، ولها الخصائص الدقيقة الموصوفة في القصة أعلاه. إذا كنت تحوم في مركبة فضائية ذات محرك صاروخي فوق أفق ثقب تبلغ كتلته 15 تريليون كتلة شمسية،

فأنا أضمن أن قوانين الفيزياء داخل مركبتك الفضائية ستكون نفسها كما هي على الأرض، وذلك عندما تنظر إلى السماء من حولك، سوف ترى الكون بأكمله يطل عليك عبر قرص صغير ورائع من الضوء. أضمن لك أنه إذا أرسلت مسباراً آلياً إلى الأسفل بالقرب من أفق ثقب يلف محورياً، فلن يتمكن أبداً من التحرك للأمام أو للخلف بأي سرعة بخلاف سرعة دوران الثقب (270 دائرة في الثانية في المثال الذي اخترته). أنا أضمن أن الثقب الذي يلف محورياً بسرعة يمكن أن يخزن ما يصل إلى 29 ٪ من كتلته كطاقة دوران، وأن المرء إذا كان ذكياً بما فيه الكفاية، يمكنه استخراج تلك الطاقة واستخدامها.

كيف يمكنني ضمان كل هذه الأشياء بثقة كبيرة؟ بعد كل شيء، لم يسبق لي رؤية ثقب أسود. لا أحد لديه القدرة على ذلك. لم يجد علماء الفلك سوى أدلة غير مباشرة على وجود الثقوب السوداء، ولم يجدوا أي دليل رصدي على الإطلاق لخصائصها التفصيلية المزعومة. كيف يمكنني أن أكون جريئاً إلى هذا الحد حتى أضمن الكثير عنها؟ لسبب واحد بسيط. مثلما تنبأ قوانين الفيزياء بنمط المد والجزر على محيطات الأرض، وزمن وارتفاع كل مد مرتفع وكل جزر منخفض، كذلك قوانين الفيزياء، إذا فهمناها بشكل صحيح، تنبأ بخصائص الثقب الأسود من دون موارد. ومن وصف نيوتن لقوانين الفيزياء يمكن استنتاج، بالحسابات الرياضية، تسلسل المد والجزر على الأرض لعام 1999 أو عام 2010؛ وبالمثل -من وصف قوانين النسبية العامة لأينشتاين- يمكن للمرء أن يستنتج، من خلال الحسابات الرياضية، كل ما يمكن معرفته عن خصائص الثقوب السوداء، من الأفق إلى خارج وما يحيط بالثقب.

ولماذا أعتقد أن وصف النسبية العامة لأينشتاين للقوانين الأساسية للفيزياء هو وصف دقيق للغاية؟ ففي نهاية المطاف، نحن نعلم أن وصف نيوتن لم يعد دقيقاً بالقرب من الثقب الأسود.

تحتوي الأوصاف الناجحة للقوانين الأساسية في حد ذاتها على إشارة قوية إلى المكان الذي ستفشل فيه 48. يخبرنا وصف نيوتن نفسه أنه من المحتمل أن يفشل بالقرب من ثقب أسود (على الرغم من أننا لم نتعلم كيفية قراءة ذلك من وصف نيوتن إلا في القرن العشرين). وبالمثل، فإن وصف النسبية العامة لأينشتاين ينضج بالثقة بنفسه خارج الثقب الأسود، وفي أفق الثقب، وداخل الثقب على طول الطريق تقريباً (ولكن ليس تماماً)، إلى المفردة في مركزه. وهذا هو الشيء الوحيد الذي يمنحني الثقة بتنبؤات النسبية العامة.

والسبب الآخر هو حقيقة أنه على الرغم من أن تنبؤات النسبية العامة بشأن الثقوب السوداء لم تُختبر بشكل مباشر بعد، فإن هناك اختبارات عالية الدقة لميزات أخرى للنسبية العامة: على الأرض، وفي النظام الشمسي، وفي الأنظمة الثنائية التي تحتوي على أجسام مدمجة، ونجوم غريبة تسمى النجوم النابضة. لقد مرت النسبية العامة بكل اختبار بنجاح.

على مدار الثلاثين عامًا الماضية، شاركت في بحث الفيزياء النظرية الذي أنتج فهمنا الحالي للثقوب السوداء، وفي بحث اختبار تنبؤات الثقوب السوداء من خلال بيانات الرصد الفلكية. لقد كانت مساهماتي الخاصة متواضعة، ولكنني استمتعت مع زملائي الفيزيائيين وعلماء الفلك بإثارة هذا البحث، وأذهلتني البصيرة التي نتجت عنه. هذا الكتاب هو محاولتي لإيصال بعض الإحساس بهذه الإثارة والإعجاب إلى أشخاص ليسوا خبراء في علم الفلك أو الفيزياء.

1. الفصول الثالث والسادس والسابع.

2. الفصل الثامن.

3. الفصل الثامن.

4. الفصلان الثالث والسادس.

5. الفصل السادس.

6. الفصل الثاني.

7. سيجد القراء الذين يرغبون في حساب خصائص الثقوب السوداء بأنفسهم الصيغ الرياضية ذات الصلة في الملاحظات الموجودة في نهاية الكتاب.

8. الفصول من الثالث إلى الخامس.

9. الفصل الثاني.

10. لمزيد من المناقشة حول مفهوم أن قوانين الفيزياء تجبر الثقوب السوداء، والنظام الشمسي، والكون، على التصرف بطرق معينة، راجع الفقرات القليلة الأخيرة من الفصل الأول.

11. الفصل الثاني.

12. الفصل السابع.

13. الفصل السابع.

14. المرجع نفسه.

15. الفصل الثالث: الكومية 18.5 كيلومتر، التي ستظهر عدة مرات في هذا الكتاب، هي 41 ± (أي 12.5663706).

مضروبًا في ثابت جاذبية نيوتن مضروبًا في كتلة الشمس مقسومة على مربع سرعة الضوء. للتعرف على هذه

الصيغة الرياضية وغيرها من الصيغ المفيدة التي تصف الثقوب السوداء، راجع الملاحظات الخاصة بهذا الفصل.

16. الفصل الثالث عشر.

17. الفصل الثالث والثالث عشر.
18. الفصل الثالث عشر.
19. انظر الإطار 2.3.
20. الفصلان الثاني والثالث.
21. الفصل السادس.
22. الفصل الثاني.
23. المرجع نفسه.
24. الفصل الثالث عشر.
25. المرجع نفسه.
26. الفصل الأول.
27. المرجع نفسه.
28. الفصل الثاني.
29. الفصل التاسع.
30. الفصل الثامن.
31. الفصلان الثاني والثالث.
32. الفصل الثاني.
33. الفصل التاسع.
34. الفصلان التاسع والعاشر.
35. الفصل العاشر.
36. الفصل العاشر.
37. الفصل الثاني عشر.
38. الفصول من الرابع إلى السادس، العاشر، الفصول من الثاني عشر إلى الرابع عشر.
39. الفصل الثاني عشر.
40. الفصل السابع.
41. الفصل السابع.
42. الفصلان السابع والحادي عشر.
43. الفصلان التاسع والحادي عشر.
44. الفصل الرابع عشر.
45. الفصلان الثالث عشر والرابع عشر.
46. الفصل الرابع عشر.
47. الفصلان الثامن والتاسع.
48. القسم الأخير من الفصل الأول.

الفصل الأول : نسبية المكان والزمن

والذي يدمر فيه أينشتاين تصورات نيوتن
عن المكان والزمن باعتبارهما مطلقين.

13 أبريل 1901

البروفيسور فيلهلم أوستفالد

جامعة لايبزج بلايبزج

ألمانيا

السيد الأستاذ المبجل!

الرجاء العفو عن الأب الذي تجرأ على اللجوء إليك -أيها السيد الأستاذ الموقر- من أجل مصلحة ابنه.

في البداية، أود أن أوضح أن ابني ألبرت يبلغ من العمر 22 عامًا، وأنه درس في المعهد الفيدرالي السويسري للتكنولوجيا في زيورخ لمدة 4 سنوات، وأنه اجتاز امتحانات الدبلوم في الرياضيات والفيزياء بنجاح كبير في الصيف الماضي. ومنذ ذلك الحين وهو يحاول من دون جدوى الحصول على منصب مساعد، مما يمكنه من مواصلة تعليمه في الفيزياء النظرية والتجريبية. كل من هم في وضع يسمح لهم بالحكم على هذا الأمر، يمتدحون مواهبه؛ على أي حال، يمكنني أنؤكد لكم أنه مجتهد ومثابر بشكل غير عادي، ولديه شغف كبير تجاه العلوم.

لذلك، يشعر ابني بالاستياء الشديد بسبب عدم قدرته على الحصول على هذا المنصب حاليًا، كما أن فكرته بأن يخرج عن المسار الصحيح في حياته المهنية، وأن يصبح الآن بعيدًا عن الاتصال بالعلوم، تترسخ أكثر فأكثر كل يوم. بالإضافة إلى ذلك، فهو مضطهد بفكرة أنه عبء علينا، نحن الأشخاص المتواضعين.

وبما أنك أنت، أيها السيد الأستاذ المبجل، الذي يبدو أن ابني معجب به ويقدره أكثر من أي باحث آخر نشط حاليًا في الفيزياء، فإنني أتقدم لسيادتكم بأمل كبير وتواضع جم بطلب لقراءة بحثه المنشور في حولية الفيزياء Annalen für Physick وأن تكتب له، إن أمكن، بضع كلمات تشجيعية، حتى يستعيد سعادته في العيش والعمل.

بالإضافة إلى ذلك، إذا تمكنت من تأمين منصب مساعد له الآن أو في الخريف المقبل، فإن امتناني لن يكون له حدود.

أتوسل إليك مرة أخرى أن تسامحني على وقاحتي بالكتابة إليك، واسمح لي أن أبلغكم أن ابني لا يعرف شيئًا عن هذه الخطوة الاستثنائية.

وإني سأظل، أيها الأستاذ المبجل، مخلصًا لسيادتكم

هيرمان أينشتاين

لقد كانت بالفعل فترة اكتئاب لألبرت أينشتاين. فقد ظل عاطلاً عن العمل لمدة ثمانية أشهر، منذ تخرجه في جامعة زيورخ للفنون التطبيقية في سن الحادية والعشرين، وشعر بالفشل.

في المعهد الفيدرالي السويسري للتكنولوجيا (الذي يسمى عادة «ETH» باستخدام الأحرف الأولى من اسمه باللغة الألمانية)، درس أينشتاين على يد العديد من علماء الفيزياء والرياضيات الأكثر شهرة في العالم، لكنه لم يكن على علاقة جيدة معهم. في العالم الأكاديمي في مطلع القرن حيث كان معظم الأساتذة (بحرف كبير P في كلمة professors كناية عن التوقير) يطالبون ويتوقعون الاحترام، لم يقدم أينشتاين سوى القليل. منذ طفولته كان يعارض السلطة، ويتساءل دائمًا، ولا يقبل أبدًا أي شيء من دون اختبار حقيقته بنفسه. وأكد أن «الاحترام غير المدروس للسلطة هو أعظم عدو للحقيقة». اشتكى هاينريش فيبر، أحد أشهر أستاذين من أساتذته في الفيزياء في ETH، بغضب: «أنت فتى ذكي يا أينشتاين، فتى ذكي جدًا. ولكن لديك خطأ واحد عظيم: أنك لا تسمح لنفسك بسماع كلام الآخرين». سأله أستاذ الفيزياء الآخر، جان بيرنيه، لماذا لم تدرس الطب أو القانون أو قواعد اللغة بدلًا من الفيزياء. قال بيرنيه: «يمكنك أن تفعل ما تريد، لكنني أود فقط أن أحذرك من أجل مصلحتك الخاصة».

لم يجعل أينشتاين الأمور أفضل من خلال موقفه غير الرسمي تجاه الدورات الدراسية.

قال لاحقاً: «كان على المرء أن يحشر كل هذه الأشياء في ذهنه من أجل الامتحانات سواء أحب ذلك أم لا». أستاذ الرياضيات الخاص به، هيرمان مينكوفسكي -والذي سنسمع عنه الكثير في الفصل الثاني- كان منزعجاً جداً من موقف أينشتاين لدرجة وصفه بـ«الكلب الكسول».

لكن أينشتاين الكسول لم يتكاسل. لقد كان انتقائياً فقط. لقد استوعب بعض أجزاء المقرر الدراسي بدقة. وتجاهل الأجزاء الأخرى، مفضلاً قضاء وقته في الدراسة والتفكير الذاتي. كان التفكير ممتعاً ومبهجاً ومُرضياً؛ يمكنه بمفرده أن يتعلم عن الفيزياء «الجديدة»، الفيزياء التي حذفها هاينريش فيبر من جميع محاضراته.

المكان والزمن المطلقان لنيوتن، والأشير

إن الفيزياء «القديمة»، وهي الفيزياء التي استطاع أينشتاين أن يتعلمها من فيبر، عبارة عن مجموعة كبيرة من المعرفة التي سُمِّيتها فيزياء نيوتن، ليس لأن إسحاق نيوتن كان مسؤولاً عنها كلها (في الواقع لم يكن مسؤولاً)، ولكن لأن أسسها وُضعت على يد نيوتن في القرن السابع عشر.

بحلول أواخر القرن التاسع عشر، أصبح من الممكن تفسير جميع الظواهر المتباينة في الكون المادي بشكل جميل من خلال مجموعة من قوانين فيزياء نيوتن البسيطة. على سبيل المثال، يمكن تفسير جميع الظواهر التي تحتوي على الجاذبية من خلال قوانين نيوتن للحركة والجاذبية:

- يتحرك كل جسم بشكل منتظم في خط مستقيم ما لم تؤثر عليه قوة ما.
- عندما تؤثر قوة ما على جسم، فإن سرعة الجسم تتغير بمعدل يتناسب طردياً مع القوة ويتناسب عكسياً مع كتلته.
- بين أي جسمين في الكون توجد قوة جاذبية تتناسب طردياً مع حاصل ضرب كتليهما وعكسياً مع مربع المسافة بينهما.

ومن خلال التلاعب رياضياً بهذه القوانين الثلاثة 1، تمكّن فيزيائيو القرن التاسع عشر من تفسير مدارات الكواكب حول الشمس، ومدارات الأقمار حول الكواكب، وقوى المد والجزر في المحيطات، وسقوط الصخور؛ وأمكنهم حتى تعلم كيفية وزن الشمس

والأرض. وبالمثل، من خلال معالجة مجموعة بسيطة من القوانين الكهربائية والمغناطيسية، تمكن الفيزيائيون من تفسير البرق والمغناطيس وموجات الراديو وانتشار الضوء وحيوده وانعكاسه.

كانت الشهرة والثروة في انتظار أولئك الذين يستطيعون تسخير قوانين نيوتن في التكنولوجيا. من خلال التلاعب بقوانين الحرارة في فيزياء نيوتن، اكتشف جيمس وات كيفية تحويل المحرك البخاري البدائي الذي ابتكره آخرون إلى الجهاز العملي الذي أصبح يحمل اسمه. ومن خلال الاعتماد بشكل كبير على فهم جوزيف هنري لقوانين الكهرباء والمغناطيسية، ابتكر صموئيل مورس نسخته المربحة من التلجراف.

افتخر المخترعون والفيزيائيون على حد سواء بكمال فهمهم. يبدو أن كل شيء في السماوات والأرض يخضع لقوانين فيزياء نيوتن، وأصبح التمكن من القوانين يمنح البشر السيطرة على بيئتهم - وربما في يوم من الأيام سيحقق السيطرة على الكون بأكمله.

كل قوانين نيوتن القديمة الراسخة وتطبيقاتها التكنولوجية استطاع أينشتاين أن يتعلمها في محاضرات هابنريش فيبر، ويتعلمها جيداً. في الواقع، في سنواته العديدة الأولى في المعهد الفيدرالي للتكنولوجيا، تحمس أينشتاين لفيدر. كتب إلى المرأة الوحيدة في فصله في ETH، ميليفيا ماريك (التي كان مفتوناً بها)، في فبراير 1898: «لقد ألقى فيبر محاضراته ببراعة. إنني أنتظر بفارغ الصبر كل فصل دراسي له».

ولكن في عامه الرابع في ETH أصبح أينشتاين غير راضٍ للغاية. حضر فيبر فقط عن الفيزياء القديمة. لقد تجاهل تمامًا بعضًا من أهم التطورات التي حدثت في العقود الأخيرة، بما في ذلك اكتشاف جيمس كليرك ماكسويل لمجموعة جديدة من القوانين الكهرومغناطيسية الأنيقة التي يمكن للمرء من خلالها استنتاج جميع الظواهر الكهرومغناطيسية: سلوك المغناطيس، والشرر الكهربائي، والدوائر الكهربائية، وموجات الراديو، والضوء... أصبح لزامًا على أينشتاين أن يعلم نفسه قوانين ماكسويل الموحدة للكهرومغناطيسية من خلال قراءة الكتب الحديثة التي كتبها فيزيائيون في جامعات أخرى، ومن المفترض أنه لم يتردد في إبلاغ فيبر عن استيائه. تدهورت علاقاته مع فيبر.

إذا نظرنا إلى الماضي، فمن الواضح أنه من بين كل الأشياء التي تجاهلها فيبر في محاضراته، فإن الأهم هو الأدلة المتزايدة على وجود تصدعات في أسس فيزياء نيوتن،

ومحور هذه الأسس هو مفاهيم نيوتن عن المكان والزمن باعتبارهما مطلقين.

إن الفضاء / المكان المطلق عند نيوتن هو مكان الخبرة اليومية، بأبعاده الثلاثة: الشرق والغرب، والشمال والجنوب، والأعلى والأسفل. كان من الواضح من التجربة اليومية أن هناك مكانًا واحدًا فقط من هذا القبيل. إنه مكان مشترك بين البشرية جمعاء، الشمس، جميع الكواكب والنجوم. نحن جميعًا نتحرك عبر هذا المكان بطرقنا الخاصة وبسرعاتنا الخاصة، وبصرف النظر عن حركتنا، فإننا نختبر المكان بنفس الطريقة. يمنحنا هذا المكان إحساسنا بالطول والعرض والارتفاع؛ ووفقًا لنيوتن، فإننا جميعًا، بصرف النظر عن حركتنا، سنتفق على طول الجسم وعرضه وارتفاعه، ما دمنا أجرينا قياسات دقيقة بما فيه الكفاية.

إن الزمن المطلق عند نيوتن هو زمن التجربة اليومية، وهو الزمن الذي يتدفق بلا هوادة إلى الأمام مع تقدمنا في العمر، وهو الزمن الذي يُقاس بساعات عالية الجودة عن طريق دوران الأرض وحركة الكواكب. إنه الزمن الذي تجري فيه الخبرة المشتركة للبشرية جمعاء، وللشمس، ولكل الكواكب والنجوم. ووفقًا لنيوتن، فإننا جميعًا، بصرف النظر عن حركتنا، سوف نتفق على فترة مدار كوكب ما أو مدة خطاب بعض السياسيين، ما دمنا جميعًا نستخدم ساعات دقيقة بما فيه الكفاية لتوقيت المدار أو الخطاب.

إذا انهارت مفاهيم نيوتن عن المكان والزمن باعتبارهما مطلقين، فسوف ينهار صرح قوانين فيزياء نيوتن بأكمله. ولحسن الحظ، سنة بعد سنة، وعقد بعد عقد، وقرن بعد قرن، ظلت مفاهيم نيوتن الأساسية صامدة، منتجة انتصارات علمية تلو الأخرى، من مجال الكواكب إلى مجال الكهرباء إلى مجال الحرارة. لم يكن هناك أي علامة على وجود أي صدع في الأساس، حتى عام 1881، عندما بدأ ألبرت مايكلسون في حساب زمن انتشار الضوء.

بدا الأمر واضحًا، كما طالبت قوانين نيوتن بذلك، أنه إذا قاس المرء سرعة الضوء (أو أي شيء آخر)، فإن النتيجة يجب أن تعتمد على كيفية حركته. إذا كان الشخص في حالة سكون في المكان المطلق، يجب أن يرى نفس سرعة الضوء في جميع الاتجاهات. على النقيض من ذلك، إذا كان الشخص يتحرك عبر المكان المطلق، مثلًا شرقًا، يجب أن يرى الضوء المنتشر شرقًا يتباطأ والضوء المنتشر غربًا يتسارع، تمامًا كما يرى الشخص في

قطار متجه شرقاً الطيور التي تحلق شرقاً تتباطأ والطيور التي تحلق غرباً تتسارع.

بالنسبة إلى الطيور، الهواء هو الذي ينظم سرعة طيرانها. تتحرك الطيور من كل نوع، بضرب أجنحتها في الهواء، بنفس السرعة القصوى في الهواء بصرف النظر عن اتجاه طيرانها. وبالمثل، بالنسبة إلى الضوء، هناك مادة تسمى الأثير هي التي تنظم سرعة الانتشار، وفقاً لقوانين نيوتن الفيزيائية. بضرب مجالاته الكهربائية والمغناطيسية في الأثير، ينتشر الضوء دائماً بنفس السرعة العمومية/ الكونية عبر الأثير، بصرف النظر عن اتجاه انتشاره. وحيث إن الأثير (وفقاً لمفاهيم فيزياء نيوتن) ساكن في المكان المطلق، فإن أي شخص ساكن سيقس نفس سرعة الضوء في جميع الاتجاهات، في حين أن أي شخص متحرك سيقس سرعات ضوء مختلفة.

والآن تتحرك الأرض في الفضاء المطلق، إن لم يكن لسبب آخر سوى حركتها حول الشمس؛ فهي تتحرك في اتجاه واحد في شهر يناير، ثم في الاتجاه المعاكس بعد ستة أشهر، في شهر يونيو. في المقابل، يجب علينا نحن على الأرض أن نقيس سرعة الضوء لتكون مختلفة في اتجاهات مختلفة، ويجب أن تتغير الاختلافات مع الفصول -ولو بشكل طفيف جداً (قربة جزء واحد من 10000)، لأن الأرض تتحرك ببطء شديد مقارنة بالضوء.

مثل التحقق من هذا التنبؤ تحدياً رائعاً للفيزيائيين التجريبيين. قبل ألبرت مايكلسون -وهو أمريكي يبلغ من العمر ثمانية وعشرين عاماً- التحدي في عام 1881، باستخدام تقنية تجريبية دقيقة للغاية (تسمى الآن «قياس مايكلسون للتداخل»²) من اختراعه. ولكن مهما حاول، لم يتمكن مايكلسون من العثور على أي دليل على الإطلاق على أي اختلاف في سرعة الضوء مع الاتجاه. تبين أن السرعة هي نفسها في جميع الاتجاهات وفي جميع الفصول في تجاربه الأولية عام 1881 في بوتسدام، ألمانيا، ونفس الشيء بدقة أعلى بكثير في تجارب لاحقة عام 1887 أجراها مايكلسون في كليفلاند، أوهايو، بالاشتراك مع الكيميائي إدوارد مورلي. أصبح رد فعل مايكلسون مزيجاً من الابتهاج لاكتشافه، والفرح من عواقبه. اتسم رد فعل هاينريش فيبر ومعظم علماء الفيزياء الآخرين في تسعينيات القرن التاسع عشر بالتشكك.

إنه من السهل أن تكون متشككاً. غالباً ما تكون التجارب المثيرة للاهتمام صعبة للغاية، بل إنها في الواقع صعبة للغاية، وبصرف النظر عن مدى دقة تنفيذها، فإنها يمكن أن تعطي نتائج خاطئة. مجرد خلل بسيط في الجهاز، أو تقلب بسيط غير منضبط في درجة حرارته،

أو اهتزاز واحد غير متوقع للأرضية تحته، قد يغير النتيجة النهائية للتجربة. وبالتالي، ليس من المستغرب أن يواجه فيزيائيو اليوم، مثل فيزيائيي تسعينيات القرن التاسع عشر، أحياناً تجارب صعبة للغاية يتعارض بعضها مع بعض، أو تتعارض مع معتقداتنا التي نعز بها بشدة حول طبيعة الكون وقوانينه الفيزيائية. الأمثلة الحديثة هي التجارب التي تهدف إلى اكتشاف «القوة الخامسة» (قوة غير موجودة في القوانين الفيزيائية القياسية الناجحة للغاية)، والتجارب الأخرى التي تنكر وجود مثل هذه القوة؛ وكذلك تجارب تدّعي اكتشاف «الاندماج البارد» (وهي ظاهرة تحرمها القوانين القياسية، إذا فهم الفيزيائيون تلك القوانين بشكل صحيح)، وتجارب أخرى تنكر حدوث الاندماج البارد. غالباً ما نعتبر التجارب التي تهدد معتقداتنا العزيزة خاطئة؛ نتائجها الثورية هي نتيجة لخطأ تجريبي. ومع ذلك، في بعض الأحيان يكونون على حق ويشيرون إلى الطريق نحو ثورة في فهمنا للطبيعة.

إحدى علامات الفيزيائي المتميز هي القدرة على «شم» التجارب التي يجب الوثوق بها، والتجارب التي لا يمكن الوثوق بها؛ والتي يجب أن تقلق بشأنها والتي يجب تجاهلها. مع تطور التكنولوجيا وتكرار التجارب مراراً وتكراراً، تصبح الحقيقة واضحة في النهاية، ولكن إذا حاول المرء المساهمة في تقدم العلم، وإذا أراد المرء أن يضع بصماته على الاكتشافات الكبرى، فإنه يحتاج إلى التكهن مبكراً، وليس لاحقاً، بالتجارب التي يجب أن يثق بها.

فحص العديد من علماء الفيزياء البارزين في تسعينيات القرن التاسع عشر تجربة مايكلسون-مورلي وخلصوا إلى أن التفاصيل الدقيقة للجهاز والعناية الرائعة التي نُفذت بها بمثابة حجتين مقنعتين للغاية. قرروا أن هذه التجربة «رائعتها طيبة». ربما هناك خطأ ما في أسس فيزياء نيوتن. وعلى النقيض من ذلك، وثق هاينريش فيبر ومعظم الآخرين بأن كل شيء سينتهي على ما يرام مع مرور الوقت والمزيد من الجهود التجريبية. سوف تنتصر فيزياء نيوتن في النهاية، كما حدث مرات عديدة من قبل. ومن غير المناسب مجرد ذكر هذه التجربة في المحاضرات الجامعية؛ لا ينبغي للمرء أن يضلل العقول الشابة.

الفيزيائي الأيرلندي جورج ف. فيتزجيرالد هو أول من قبل تجربة مايكلسون-مورلي في ظاهرها وتكهن بآثارها. ومن خلال مقارنتها بتجارب أخرى، توصل إلى نتيجة ثورية مفادها أن الخطأ يكمن في فهم الفيزيائيين لمفهوم «الطول»، وبالتالي ربما هناك خطأ ما في مفهوم نيوتن للمكان المطلق. في مقال قصير نُشر عام 1889 في دورية العلوم الأمريكية، كتب جزئياً:

لقد قرأت باهتمام كبير تجربة السيدين مايكلسون ومورلي الدقيقة والرائعة... تبدو نتائجهما متعارضة مع التجارب الأخرى... وأقترح أن الفرضية الوحيدة تقريباً التي يمكنها التوفيق بين هذا التعارض هي أن أطوال الأجسام المادية تتغير وفقاً لحركتها من خلال الأثير [في المكان المطلق] أو عبره، بمقدار يعتمد على مربع نسبة سرعتها إلى سرعة الضوء.

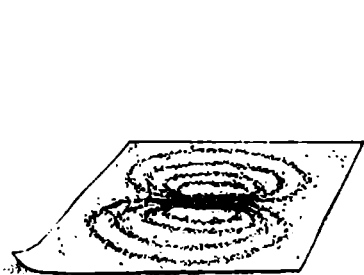
إن انكماشاً طفيفاً (خمس أجزاء من المليار) في الطول في اتجاه حركة الأرض يمكن أن يفسر بالفعل النتيجة الصفرية لتجربة مايكلسون-مورلي. لكن هذا يتطلب إنكار فهم الفيزيائيين لسلوك المادة: لا توجد قوة معروفة يمكنها أن تجعل الأجسام المتحركة تنكمش في اتجاه حركتها، ولا حتى بهذا المقدار الدقيق. إذا فهم الفيزيائيون بشكل صحيح طبيعة الفضاء وطبيعة القوى الجزيئية داخل الأجسام الصلبة، فإن الأجسام الصلبة المتحركة بشكل منتظم يجب أن تحتفظ دائماً بنفس الشكل والحجم بالنسبة إلى الفضاء المطلق، بصرف النظر عن مدى سرعة تحركها.

كما آمن هندريك لورنتز في أمستردام بتجربة مايكلسون-مورلي، وأخذ على محمل الجد اقتراح فيتزجيرالد بأن الأجسام المتحركة تنكمش. عندما علم فيتزجيرالد بهذا، كتب إلى لورنتز معرباً عن سعادته، لسبب: «لقد سخر الجميع مني بسبب وجهة نظري هنا». في بحثه عن فهم أعمق، أعاد لورنتز، وبشكل مستقل هنري بوانكاريه في باريس، فرنسا، وجوزيف لارمور في كامبريدج، إنجلترا، فحص قوانين الكهرومغناطيسية، ولاحظوا خصوصية تتوافق مع فكرة فيتزجيرالد للانكماش الطولي:

إذا عبر أحدهم عن قوانين ماكسويل الكهرومغناطيسية من حيث المجالات الكهربائية والمغناطيسية المقيسة في حالة السكون في المكان المطلق، فإن القوانين ستتخذ شكلاً رياضياً بسيطاً وجميلاً بشكل خاص. على سبيل المثال، تقول أحد القوانين ببساطة: «كما يراها أي شخص ساكن في المكان المطلق، فإن خطوط المجال المغناطيسي ليست لها نهايات» (انظر الشكل 1.1 a.b). ومع ذلك، إذا عبر أحدهم عن قوانين ماكسويل في ضوء المجالات المختلفة قليلاً التي يقيسها شخص متحرك، فإن القوانين تبدو أكثر تعقيداً وقبحاً. على وجه الخصوص، يصبح قانون «من دون نهاية» كما يلي: «كما يرى شخص متحرك، فإن معظم خطوط المجال المغناطيسي لا نهاية لها، ولكن القليل منها يقطع بواسطة الحركة، وبالتالي يكتسب نهايات. بالإضافة إلى ذلك، عندما يهز الشخص المتحرك المغناطيس، تنقطع خطوط المجال الجديدة، ثم تلتئم، ثم تنقطع مرة أخرى، ثم تلتئم مرة أخرى» (انظر الشكل 1.1 c).

أصبح الاكتشاف الرياضي الجديد الذي قام به لورنتز وبوانكاريه ولارمور وسيلة لجعل القوانين الكهرومغناطيسية للشخص المتحرك تبدو جميلة، وفي الواقع تبدو مطابقة للقوانين التي يستخدمها شخص ساكن في المكان المطلق: «خطوط المجال المغناطيسي من دون نهاية أبدًا، تحت أي ظروف مهما كانت». يمكن للمرء أن يجعل القوانين تتخذ هذا الشكل الجميل من خلال التظاهر، خلافًا لمبادئ نيوتن، بأن جميع الأجسام المتحركة تنكمش في اتجاه حركتها بالقدر الذي احتاج إليه فيتزجيرالد لشرح تجربة مايكلسون ومورلي!

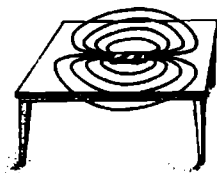
لو أن انكماش فيتزجيرالد هو «الفيزياء الجديدة» الوحيدة التي يحتاج إليها المرء لجعل القوانين الكهرومغناطيسية المعممة بسيطة وجميلة، لربما رأى لورنتز وبوانكاريه ولارمور، بإيمانهم البديهي، أن قوانين الفيزياء يجب أن تكون جميلة. لقد نحّوا مبادئ نيوتن جانبًا وآمنوا بيقين بفكرة الانكماش. لكن الانكماش في حد ذاته لم يكن كافيًا. ولجعل القوانين جميلة، توجب على المرء أيضًا أن يتظاهر بأن الزمن يتدفق بشكل أبطأ عند قياسه بواسطة شخص يتحرك عبر الكون مقارنةً بشخص ساكن؛ الحركة «تمدد» الزمن.



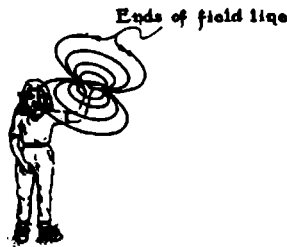
(a)



(b) At rest in absolute space



(c) On the moving Earth



1.1 أحد قوانين ماكسويل الكهرومغناطيسية، كما تفهم في إطار فيزياء نيوتن في القرن التاسع عشر: (a) مفهوم خط المجال المغناطيسي: عندما يضع أحدهم قضيبًا مغناطيسيًا تحت قطعة من

الورق ويثر برادة الحديد فوق سطح الورقة، فإن برادة الحديد تحدد خطوط المجال المغناطيسي فوق الورقة. يغادر كل خط مجال القطب الشمالي للمغناطيس، ويتأرجح حول المغناطيس ويعود إلى القطب الجنوبي، ثم ينتقل عبر المغناطيس إلى القطب الشمالي، حيث يلتصق بنفسه. وبالتالي فإن خط المجال هو منحنى مغلق، يشبه إلى حد ما الشريط المطاطي، من دون أي أطراف. إن عبارة «خطوط المجال المغناطيسي ليست لها نهاية أبداً» هي قانون ماكسويل في أبسط صورها وأجملها. (b) وفقاً لفيزياء نيوتن، فإن هذه النسخة من قانون ماكسويل صحيحة بصرف النظر عما يفعله المرء بالمغناطيس (على سبيل المثال، حتى لو هزّه بقوة) ما دام أنه في حالة سكون في الفضاء المطلق. لا يوجد أي خط مجال مغناطيسي له أي نهاية على الإطلاق، من وجهة نظر شخص ما في حالة سكون. (c) عندما يدرسه شخص يركب على سطح الأرض في أثناء تحركه عبر المكان المطلق، يكون قانون ماكسويل أكثر تعقيداً وفقاً لفيزياء نيوتن. إذا كان مغناطيس الشخص المتحرك موضوعاً بهدوء على طاولة، فإن عدداً قليلاً من خطوط المجال (نحو واحد من مائة مليون) سيكون لها نهايات. إذا هز الشخص المغناطيس بشدة، فستقطع خطوط المجال الإضافية (واحد من تريليون) مؤقتاً بسبب الاهتزاز، ثم ستلتصق، ثم تنقطع، ثم تلتصق. على الرغم من أن خط مجال واحد من مائة مليون أو تريليون من النهايات هو عدد ضعيف للغاية بحيث لا يمكن تمييزه في أي تجربة فيزيائية في القرن التاسع عشر، فإن حقيقة أن قوانين ماكسويل تنبأت بمثل هذا الشيء بدت معقدة وقيحية إلى حد ما في نظر لورنتز وبوانكاريه ولارمور.

الآن، إن فيزياء نيوتن قاطعة: الزمن مطلق. إنه يتدفق بشكل موحد وبلا هوادة بنفس المعدل المعمم/ الكوني، بصرف النظر عن الكيفية التي يتحرك بها المرء. إذا كانت قوانين نيوتن صحيحة، فإن الحركة لا يمكن أن تسبب تمدد الزمن كما أنها لا يمكن أن تسبب انكماش الأطوال. لسوء الحظ، الساعات في تسعينيات القرن التاسع عشر غير دقيقة إلى حد كبير بحيث لم تتمكن من الكشف عن الحقيقة؛ وفي مواجهة الانتصارات العلمية والتكنولوجية لفيزياء نيوتن، والانتصارات المرتكزة بقوة على أساس الزمن المطلق، لم يكن أحد على استعداد لتأكيد عدم الاقتناع بأن الزمن يتمدد بالفعل. سخر الجميع من لورنتز وبوانكاريه ولارمور.

لم يكن أينشتاين، عندما كان طالباً في زيورخ، مستعداً بعد للتعامل مع مثل هذه القضايا المثيرة للقلق، لكنه قد بدأ بالفعل في التفكير فيها. كتب إلى صديقه ميليفا ماريك (التي بدأ ينخرطان معاً في الرومانسية) في أغسطس عام 1899: «أنا مقتنع أكثر فأكثر بأن الديناميكا الكهربائية للأجسام المتحركة، كما تُقدّم اليوم، ليست صحيحة». وعلى مدى

السنوات الست التالية، ومع نضوج قدراته كفيزيائي، فكر في هذه القضية وحقيقة انكماش الأطوال وتمدد الزمن.

وعلى النقيض من ذلك، لم يُظهر فيبر أي اهتمام بمثل هذه القضايا التخمينية. لقد استمر في إلقاء المحاضرات حول فيزياء نيوتن كما لو كانت جميعها في نظام مثالي، كما لو أنه لا توجد أي إشارات على وجود تصدعات في أساس الفيزياء.

عندما اقترب أينشتاين من نهاية دراسته في ETH، افترض بسذاجة أنه نظرًا لذكائه ولأنه كان جيدًا في مقرراته (العلامة الإجمالية 4.91 من 6.00)، سوف يُعرض عليه منصب «مساعد» في الفيزياء في ETH تحت قيادة فيبر، ويمكن استخدامه بالطريقة المعتادة كنقطة انطلاق إلى العالم الأكاديمي. بصفته مساعدًا، يمكنه البدء في إجراء أبحاث خاصة به، مما يؤدي في غضون سنوات قليلة إلى الحصول على درجة الدكتوراه.

ولكن هذا لم يحدث. من بين الطلاب الأربعة الذين اجتازوا امتحاناتهم النهائية في برنامج الفيزياء والرياضيات المشترك في أغسطس 1900، حصل ثلاثة منهم على منصب مساعدين في ETH ليعملوا تحت إشراف علماء الرياضيات؛ أما الرابع، أينشتاين، فلم يحصل على شيء. لقد عيّن فيبر اثنين من طلاب الهندسة كمساعدين بدلًا من أينشتاين. وظل أينشتاين يحاول. في سبتمبر، بعد شهر واحد من التخرج، تقدم بطلب للحصول على وظيفة مساعد شاغرة في الرياضيات في ETH. رُفض.

في الشتاء والربيع، تقدم بطلب إلى فيلهلم أوستفالد في لايبزج، ألمانيا، وهايكي كامرلينج أونيس في ليدن، هولندا. ويبدو أنه لم يتلقَ منهما أي رد على الإطلاق - على الرغم من أن مذكرته التي أرسلها إلى أونيس معروضة الآن بفخر في متحف في ليدن، وعلى الرغم من أن أوستفالد بعد عشر سنوات سيكون أول من رشّح أينشتاين لجائزة نوبل. وحتى الرسالة التي أرسلها والد أينشتاين إلى أوستفالد يبدو أنها لم تحظَ بأي رد.

كتب أينشتاين في 27 مارس 1901 إلى ميليفا ماريك الوقحة وقوية الإرادة، والتي أصبحت علاقته العاطفية معها عنيفة: «أنا مقتنع تمامًا بأن اللوم يقع على فيبر... ليس من المنطقي أن أكتب إلى المزيد من الأساتذة، لأنهم بالتأكيد سيلجأون إلى فيبر للحصول على معلومات عني في مرحلة معينة، وسيقدم لي توصية سيئة أخرى». كتب إلى صديق مقرب له، مارسيل جروسمان، في 14 أبريل 1901: «ربما أمكنني العثور على [منصب

مساعد] منذ فترة طويلة لولا مخادعة فيبر. ومع ذلك، لا أترك أي حجر من دون أن أقلبه ولا أتخلى عن روح الدعابة التي لديّ... فالله لمّا خلق الحمار أعطاه جلدًا غليظًا.

كان يحتاج إلى جلد غليظ؛ ليس فقط من أجل البحث عن عمل بلا جدوى، بل لأن والديه عارضاً بشدة خططه للزواج بميليفا، وكانت علاقته مع ميليفا تزداد اضطراباً. كتبت والديته عن ميليفا: «هذه الأنسة ماريك تسبب لي أحلك ساعات حياتي، لو في وسعي، لبذلت كل جهد لإبعادها عن أفقنا، أنا حقاً لا أحبها». وعن والدته أينشتاين، كتبت ميليفا: «يبدو أن تلك السيدة جعلت هدف حياتها هو أن تُشعِرنا بالمرارة قدر الإمكان، ليس فقط في حياتي، بل أيضاً في حياة ابنها... لا أعتقد أن مثل هؤلاء الأشخاص الأشرار عديمي القلب موجودون في الحياة!».

أراد أينشتاين بشدة أن يهرب من اعتماده المالي على والديه، وأن يتمتع براحة البال والحرية في تكريس معظم طاقته للفيزياء. وربما أمكن تحقيق ذلك بوسائل أخرى غير وظيفة مساعد في إحدى الجامعات. شهادته من ETH أهّلته للتدريس في صالة للألعاب الرياضية (المدرسة الثانوية)، لذلك تحول إلى ذلك: تمكن في منتصف مايو 1901 من الحصول على وظيفة مؤقتة في مدرسة ثانوية فنية في فينترتور، سويسرا، بديلاً لمدرس الرياضيات الذي توجب عليه قضاء فترة الجيش.

وكتب إلى ألفريد شتين، أستاذ التاريخ السابق في ETH: «أنا أشعر بسعادة غامرة بشأن [وظيفة التدريس هذه]، لأنني تلقيت اليوم أخباراً مفادها أن كل شيء قد رُتب بالتأكيد. ليس لديّ أدنى فكرة عما قد يكون الإنسان الذي أوصى بي هناك، لأن مما قيل لي، أنا لم أذكر بشك حسن في توصيات أيّ من أساتذتي السابقين». الوظيفة في فينترتور، تلتها في خريف عام 1901 وظيفة تدريس مؤقتة أخرى في مدرسة ثانوية في شافهاوزن، سويسرا، ثم في يونيو 1902 وظيفة «خبير تقني من الدرجة الثالثة» في مكتب براءات الاختراع السويسري في برن، مما منحه الاستقلال والاستقرار.

على الرغم من الاضطرابات المستمرة في حياته الشخصية (الانفصال لفترة طويلة عن ميليفا؛ وإنجاب طفلاً غير شرعي منها في عام 1902، ويبدو أنهما عرضاه للتبني، ربما لحماية إمكانيات أينشتاين المهنية في سويسرا المحافظة؛ وزواجه بميليفا بعد عام على الرغم من معارضة والديه العنيفة)، حافظ أينشتاين على روح متفائلة وظل صافي الذهن بما يكفي للتفكير والتأمل بعمق في الفيزياء: من عام 1901 حتى عام 1904، صقل صلاحياته

كفيزيائي من خلال البحث النظري حول طبيعة القوى بين الجزيئات. في السوائل مثل الماء، وفي المعادن، والبحث في طبيعة الحرارة. نُشرت أفكاره الجديدة، والتي كانت جوهرية، في سلسلة من خمسة مقالات في مجلة الفيزياء المرموقة في أوائل القرن العشرين: حولية الفيزياء Annalen der Physik.

كانت وظيفة مكتب براءات الاختراع في برن مناسبة تمامًا لتعزيز قوى أينشتاين. في أثناء عمله، واجه تحديًا لمعرفة ما إذا كانت الاختراعات المقدمة ستعمل أم لا، وهي مهمة مبهجة في كثير من الأحيان، وشحذت عقله. وتركته الوظيفة حرًا لنصف ساعات يقظته وطوال عطلة نهاية الأسبوع. قضى معظمها في الدراسة والتفكير في الفيزياء، وغالبًا ما كان ذلك في خضم الفوضى العائلية.

قدرته على التركيز رغم عوامل التشيت وصفتها إحدى الطالبات التي زارته في منزله بعد عدة سنوات من زواجه بميليفا: «جلس في مكتبه أمام كومة من الأوراق المغطاة بالصيغ الرياضية. كان يكتب بيده اليمنى ويحمل ابنه الأصغر بيده اليسرى، ويستمر في الرد على أسئلة ابنه الأكبر ألبرت الذي كان يلعب بالطوب. وبعد أن قال: «انتظري لحظة، لقد انتهيت تقريبًا»، أعطاني الأطفال لأعتني بهم لبضع لحظات، ثم واصل العمل».

في برن، انعزل أينشتاين عن علماء الفيزياء الآخرين (على الرغم من أن لديه عددًا قليلًا من الأصدقاء المقربين من غير الفيزيائيين الذين يمكنه مناقشة العلوم والفلسفة معهم). بالنسبة إلى معظم الفيزيائيين، مثل هذه العزلة أمر كارثي. ويتطلب معظمهم التواصل المستمر مع زملائهم الذين يعملون على حل مشكلات مماثلة لمنع أبحاثهم من الانحراف في اتجاهات غير مثمرة. لكن ذكاء أينشتاين مختلف؛ إنه يعمل بشكل مثمر في العزلة أكثر مما يعمل في بيئة محفزة للفيزيائيين الآخرين.

وقد ساعده في بعض الأحيان التحدث مع الآخرين، ليس لأنهم قدموا له رؤى أو معلومات جديدة وعميقة، بل لأنه من خلال شرح المفارقات والمشكلات للآخرين، يمكنه توضيحها في ذهنه. وكان من المفيد بشكل خاص ميكيلانجيلو بيسو، المهندس الإيطالي الذي كان زميلًا لأينشتاين في ETH ويعمل الآن بجانب أينشتاين في مكتب براءات الاختراع. قال أينشتاين عن بيسو: «لم أتمكن من العثور على مكبر صوتي لأفكاري في كل أوروبا أفضل منه».



أينشتاين يجلس على مكتبه في مكتب براءات الاختراع في برن، سويسرا، كاليفورنيا. 1905.
[حقوق محفوظة لأرشيف ألبرت أينشتاين في الجامعة العبرية في القدس].



أينشتاين مع زوجته ميليفا وابنها هانز ألبرت، كاليفورنيا. 1904.
[بإذن من أرشيف الآداب السويسري / أرشيف جمعية أينشتاين، برن].

المكان والزمن النسبيان لأينشتاين،

والسرعة المطلقة للضوء

كان ميكيلانجيلو بيسو مفيدًا بشكل خاص في مايو 1905، عندما عاد أينشتاين، بعد التركيز لعدة سنوات على قضايا فيزيائية أخرى، إلى قوانين ماكسويل الكهروديناميكية وتلميحاتها المحيرة حول انكماش الطول وتمدد الزمن. إن بحث أينشتاين عن طريقة ما لفهم هذه التلميحات قد تحول إلى انغلاق عقلي. لإزالة هذا الانغلاق، طلب المساعدة من بيسو. وكما ذكر لاحقًا: «كان ذلك يومًا جميلًا جدًا عندما زرت [بيسو] وبدأت أتحدث معه على النحو التالي: «لديّ مؤخرًا سؤال من الصعب عليّ أن أفهمه. لذلك جئت إلى هنا اليوم لأخوض معك معركة حول هذه المسألة». وبعد إجراء الكثير من المناقشات معه، تمكنت فجأة من فهم الأمر. وفي اليوم التالي زرته مرة أخرى وقلت له من دون تحية: شكرًا لك. لقد قمت بحل المشكلة تمامًا».

حل أينشتاين: لا يوجد شيء اسمه المكان المطلق. لا يوجد شيء اسمه الزمن المطلق.

إن أساس نيوتن لكل الفيزياء معيب، وأما الأثير، فهو غير موجود.

من خلال رفض المكان المطلق، جعل أينشتاين فكرة «السكون في المكان المطلق» بلا معنى على الإطلاق. وأكد أنه لا توجد طريقة لقياس حركة الأرض عبر المكان/ الفضاء المطلق، ولهذا السبب انتهت تجربة مايكلسون-مورلي بهذه الطريقة. ولا يستطيع المرء قياس سرعة الأرض إلا بالنسبة إلى الأجسام الفيزيائية الأخرى مثل الشمس أو القمر، تمامًا كما لا يمكن قياس سرعة القطار إلا بالنسبة إلى الأجسام المادية مثل الأرض والهواء، لأنه لا يوجد في الأرض ولا القطار ولا أي شيء آخر أي معيار للحركة المطلقة؛ الحركة «نسبية» بحتة.

من خلال رفض المكان المطلق، رفض أينشتاين أيضًا فكرة أن الجميع، بصرف النظر عن حركتهم، يجب أن يتفقوا على طول وارتفاع وعرض طاولة ما، أو القطار أو أي شيء آخر. على العكس من ذلك، أصر أينشتاين على أن الطول والارتفاع والعرض هي مفاهيم «نسبية». وهي تعتمد على الحركة النسبية للجسم الذي يقاس والشخص الذي يقيس.

من خلال رفض الزمن المطلق، رفض أينشتاين فكرة أن الجميع، بصرف النظر عن

حركتهم، يجب أن يختبروا تدفق الزمن بنفس الطريقة. وأكد أينشتاين أن الزمن نسبي. يجب على كل شخص يتنقل بطريقته الخاصة أن يختبر تدفقًا زمنيًا مختلفًا عن الآخرين، وأن يسافر بشكل مختلف.

من الصعب ألا تشعر بالانزعاج عندما تُعرض عليك هذه التأكيدات. لو أن هذا صحيح، فلن يقتصر الأمر على إزالة الأسس من تحت صرح القانون الفيزيائي لفيزياء نيوتن بأكملها، بل سيحرمنا أيضًا من مفهوم البديهية، ومفاهيمنا اليومية عن المكان والزمن.

لكن أينشتاين لم يكن مجرد مدمر، بل كان أيضًا مبتكرًا. لقد قدّم لنا أساسًا جديدًا ليحل محل القديم، وهو أساس ثابت تمامًا، وتبين أنه أكثر توافقًا مع الكون.

يتألف أساس أينشتاين الجديد من مبدئين أساسيين جديدين:

• مبدأ السرعة المطلقة للضوء: مهما كانت طبيعته، يجب تشكيل المكان والزمن بحيث تجعل سرعة الضوء هي نفسها تمامًا في جميع الاتجاهات، ومستقلة تمامًا عن حركة الشخص الذي يقيسها.

هذا المبدأ هو تأكيد مدوّ على أن تجربة مايكلسون-مورلي صحيحة، وأنه بصرف النظر عن مدى دقة أجهزة قياس الضوء في المستقبل، فإنها يجب أن تستمر دائمًا في إعطاء نفس النتيجة: سرعة الضوء معممة/كونية.

• مبدأ النسبية: مهما كانت طبيعتها، فإن قوانين الفيزياء يجب أن تتعامل مع جميع حالات الحركة على قدم المساواة.

يعد هذا المبدأ رفضًا مدويًا للمكان المطلق: إذا لم تتعامل قوانين الفيزياء مع جميع حالات الحركة (على سبيل المثال، حالة الشمس وحالة الأرض) على قدم المساواة، فسيستقي الفيزيائيون -باستخدام قوانين الفيزياء- بعض حالات الحركة «المفضلة» (على سبيل المثال، حالة الشمس)، ويعرّفونها على أنها حالة «السكون المطلق». ومن ثم فإن المكان المطلق قد يتسلل عائداً إلى الفيزياء. وسنعود إلى هذا لاحقاً في هذا الفصل.

من سرعة الضوء المطلقة، استنتج أينشتاين، من خلال حجة منطقية أنيقة موصوفة في الإطار 1.1 أدناه، أنه إذا تحرك أحدنا، وأنا أنت، بالنسبة إلى الآخر، فإن ما أسميه أنا المكان يجب أن يكون مزيجًا من مكانك وزمنك، وما تسميه أنت المكان يجب أن يكون مزيجًا من مكاني وزمني.

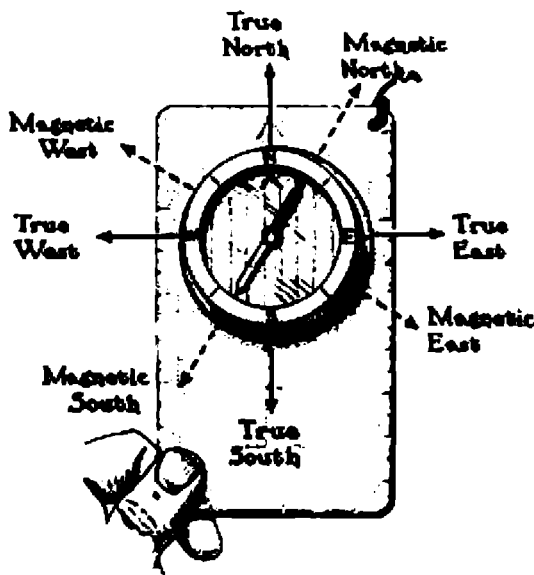
وهذا «المزج بين المكان والزمن» يشبه امتزاج الاتجاهات على الأرض. تقدم لنا الطبيعة طريقتين لحساب الاتجاهات، إحداهما مرتبطة بدوران الأرض، والأخرى مرتبطة بمجالها المغناطيسي. وفي باسادينا، كاليفورنيا، ينزاح الشمال المغناطيسي (الاتجاه الذي تشير إليه إبرة البوصلة) باتجاه الشرق من الشمال الحقيقي (الاتجاه نحو محور دوران الأرض، أي نحو «القطب الشمالي») بنحو 20 درجة؛ انظر الشكل 1.2. وهذا يعني أنه من أجل السفر في اتجاه الشمال المغناطيسي، يجب على المرء أن يسافر جزئياً (نحو 80 بالمائة) في اتجاه الشمال الحقيقي وجزئياً (نحو 20 بالمائة) باتجاه الشرق الحقيقي. وبهذا المعنى، فإن الشمال المغناطيسي هو مزج من الشمال الحقيقي والشرق الحقيقي؛ وبالمثل، فإن الشمال الحقيقي هو مزج من الشمال المغناطيسي والغرب المغناطيسي.

لفهم مقارنة المزج بين المكان والزمن (مكانك هو مزج بين مكاني وزمني، ومكاني مزج بين مكانك وزمنك)، تخيل نفسك مالك سيارة رياضية قوية. تحب أن تقود سيارتك في شارع كولورادو بوليفارد في باسادينا، كاليفورنيا، بسرعة عالية للغاية في أعماق الليل، بينما أنا شرطياً أتحصل على غفوة ليلية. قم بتوصيل سلسلة من المفترقات النارية بالجزء العلوي من سيارتك، واحدة فوق مقدمة غطاء المحرك، وواحدة فوق الجزء الخلفي من صندوق السيارة، والعديد منها بينهما؛ انظر الشكل a 1.3. قمت بضبط المفترقات النارية لتنفجر في وقت واحد كما ترى أنت، تماماً كلما مررت بمركز الشرطة الخاص بي.

وبصور الشكل b 1.3 هذا من وجهة نظرك الخاصة. ارسم تدفق الزمن عمودياً، كما تقيسه أنت («زمنك»). ارسم المسافة على طول سيارتك أفقيًا، من الخلف إلى الأمام، كما تقيسها أنت («مكانك»). نظرًا لأن المفترقات النارية كلها في حالة سكون في مكانك الخاص (أي كما تراها أنت)، فمع مرور الزمن تظل جميعها في نفس المواقع الأفقية في المخطط. الخطوط المتقطعة، واحدة لكل مفترقة نارية، تصور ذلك. وهي تمتد عمودياً إلى أعلى في الرسم التوضيحي، مما يشير إلى عدم وجود حركة يمينًا أو يسارًا في المكان على الإطلاق مع مرور الزمن، ثم تنتهي فجأة في اللحظة التي تنفجر فيها الألعاب النارية. تتصور أحداث التفجير بالعلامات النجمية.

يُسمى هذا الشكل بمخطط الزمن، لأنه يرسم المكان أفقيًا والزمن رأسيًا؛ تسمى الخطوط المتقطعة بخطوط العالم لأنها توضح المكان الذي تنتقل إليه الألعاب النارية مع مرور الزمن. وسنستخدم على نطاق واسع مخططات الزمن وخطوط العالم لاحقًا في هذا الكتاب.

إذا تحرك أحد الأشخاص أفقيًا في الرسم التوضيحي (الشكل 1.3 b)، فهذا يعني أنه يتحرك عبر المكان في لحظة ثابتة من زمنا. في المقابل، من الملائم التفكير في كل خط أفقي في الرسم التوضيحي على أنه يصور المكان، كما تراه أنت («مكانك»)، في لحظة محددة من زمنا. على سبيل المثال، الخط الأفقي المنقط هو المكان الخاص بك في لحظة تفجير الألعاب النارية. عندما يتحرك الشخص رأسياً لأعلى في الرسم التوضيحي، فإنه يتحرك عبر الزمن في مساحة ثابتة في مكانك الخاص. في المقابل، تخيل في كل خط رأسي في مخطط الزمكان (على سبيل المثال، كل خط عالمي من الألعاب النارية) باعتباره يصور تدفق زمنا في مساحة محددة من مكانك الخاص.

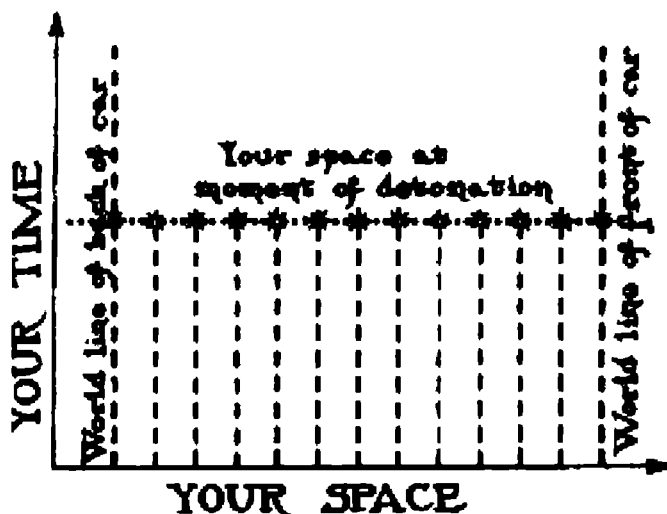
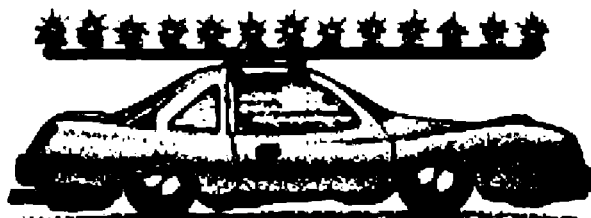


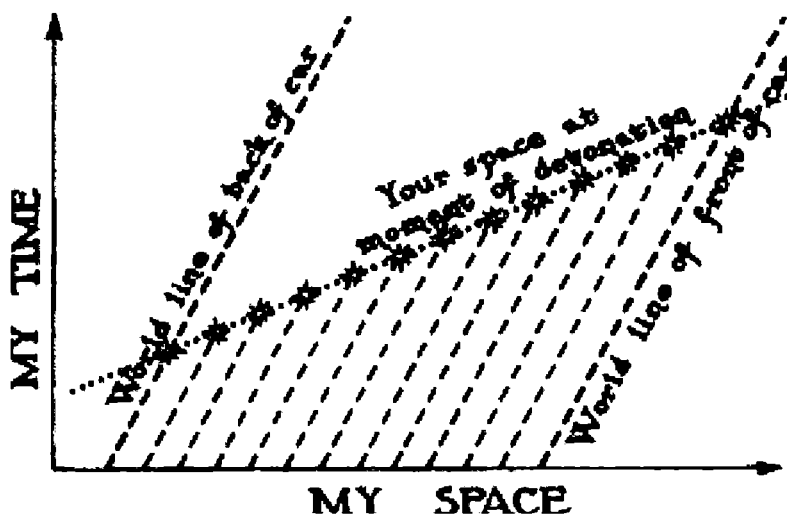
1.2 الشمال المغناطيسي هو مزج من الشمال الحقيقي والشرق الحقيقي، والشمال الحقيقي هو مزج من الشمال المغناطيسي والغرب المغناطيسي.

أنا الآن في مركز الشرطة، لو لم أكن نائمًا، لرسمت مخططًا زمكانيًا مختلفًا لتصوير سيارتك، والمفرقات النارية، والانفجار (الشكل 1.3 c). أود أن أرسم تدفق الزمن، كما قسته أنا، رأسياً، والمسافة على طول شارع كولورادو أفقيًا. مع مرور الزمن، تتحرك كل مفرقة نارية أسفل كولورادو بوليفارد بسيارتك بسرعة عالية، وبالتالي يميل الخط العالمي

للمفرقات النارية نحو اليمين في الرسم التخطيطي: في وقت تفجيرها، كانت المفرقات النارية أبعد إلى اليمين أسفل كولورادو بوليفارد مما كانت عليه في مرات سابقة.

الآن، الاستنتاج المفاجئ لحجة أينشتاين المنطقية (الإطار 1.1) هو أن سرعة الضوء المطلقة تتطلب عدم انفجار المفرقات النارية في زمن واحد كما أراها أنا، على الرغم من أنها تنفجر في زمن واحد كما رأيته أنت. من وجهة نظري أنا، ينفجر المفرق الخلفي في سيارتك أولاً، وينفجر المفرق الأمامي آخرًا. وفي المقابل، فإن الخط المنقط الذي أطلقنا عليه «المكان الخاص بك في لحظة التفجير» (الشكل 1.3 b) مائل في مخطط الزمكان الخاص بي (الشكل 1.3 c).





1.3 (a) سيارتك الرياضية تسير بسرعة في شارع كولورادو مع وجود مفترقات نارية مثبتة على سطحها. (b) مخطط الزمكان الذي يصور حركة الألعاب النارية وانفجارها من وجهة نظرك (راكب السيارة). (c) مخطط الزمكان الذي يصور نفس حركة الألعاب النارية والانفجار من وجهة نظري (في حالة السكون في مركز الشرطة).

من الشكل 1.3 c، من الواضح أنه لكي أتحرك عبر مكانك أنت في لحظة تفجيرك أنت (على طول خط التفجير المنقط)، يجب أن أتحرك عبر مكاني أنا وزمني أنا. بهذا المعنى، مكانك أنت هو مزيج من مكاني أنا وزمني أنا. وهذا هو نفس المعنى تمامًا للقول بأن الشمال المغناطيسي هو مزيج من الشمال الحقيقي والشرق الحقيقي (قارن الشكل 1.3 c مع الشكل 1.2).

قد تميل إلى تأكيد أن هذا «المزج بين المكان والزمن» ليس سوى طريقة معقدة وشوفينية للقول بأن «التزامن يعتمد على حالة حركة الفرد». هذا حقيقي.

ومع ذلك، فإن الفيزيائيين، بناءً على أسس أينشتاين، وجدوا أن طريقة التفكير هذه قوية. وقد ساعدتهم على فك رموز ميراث أينشتاين (قوانينه الجديدة في الفيزياء)، واكتشاف مجموعة من الظواهر التي تبدو وقحة في ذلك الميراث: الثقوب السوداء، والثقوب الدودية، والمفردات، والاعوجاجات الزمنية، وآلات الزمن.

ومن منطلق سرعة الضوء المطلقة ومبدأ النسبية، استنتج أينشتاين سمات أخرى رائعة للمكان والزمن. وبلغت القصة أعلاه يمكننا القول:

• استنتج أينشتاين أنه عندما تتجه بسرعة نحو الشرق في شارع كولورادو، يجب أن أرى مكانك أنت وكل شيء فيه ساكن (سيارتك، ومفرقاتك النارية، وأنت) ينكمش على طول الاتجاه الشرقي الغربي، ولكن ليس بين الشمال والجنوب أو لأعلى أو لأسفل. هذا هو الانكماش الذي استنتجه فيتزجيرالد، ولكنه وُضع الآن على أساس متين: إن الانكماش ناجم عن الطبيعة الخاصة للمكان والزمن، وليس عن طريق أي قوى فيزيائية تؤثر على المادة المتحركة.

• وبالمثل، استنتج أينشتاين أنه عندما تسرع باتجاه الشرق، يجب أن ترى مكاني وكل شيء فيه ساكن (مركز الشرطة، ومكتبي، وأنا) ينكمش على طول الاتجاه الشرقي الغربي، ولكن ليس بين الشمال والجنوب أو لأعلى أو لأسفل. أنت تراني منكشماً وأنا أراك منكشماً قد يبدو أمراً محيراً، لكنه في الحقيقة لا يمكن أن يكون غير ذلك: فهو يجعل حالتك وحالتي الحركية على قدم المساواة، وفقاً لمبدأ النسبية.

• استنتج أينشتاين أيضاً أنه عندما تتقدم بسرعة، أرى أن تدفق الزمن يتباطأ؛ أي يتمدد. تبدو الساعة الموجودة على لوحة القيادة في سيارتك وكأنها تدق بشكل أبطأ من ساعتني الموجودة على جدار مركز الشرطة. أنت تتحدث ببطء أكثر، وشعرك ينمو ببطء أكبر، وتتقدم في السن ببطء عني.

وبالمثل، ووفقاً لمبدأ النسبية، عندما تتخطاني بسرعة، ترى أن تدفق الزمن الخاص بي يتباطأ. ترى أن الساعة الموجودة على حائط قسم الشرطة تدق بشكل أبطأ من تلك الموجودة على لوحة القيادة الخاصة بك. بالنسبة إليك يبدو أنني أتحدث ببطء أكثر، وشعري ينمو ببطء أكبر، وأنا أتقدم في السن ببطء عنك.

الإطار 1.1

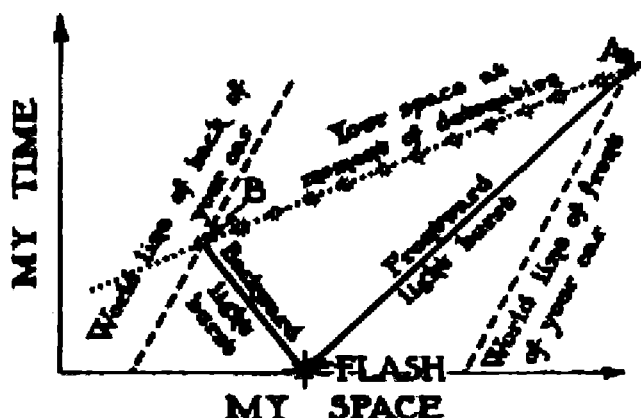
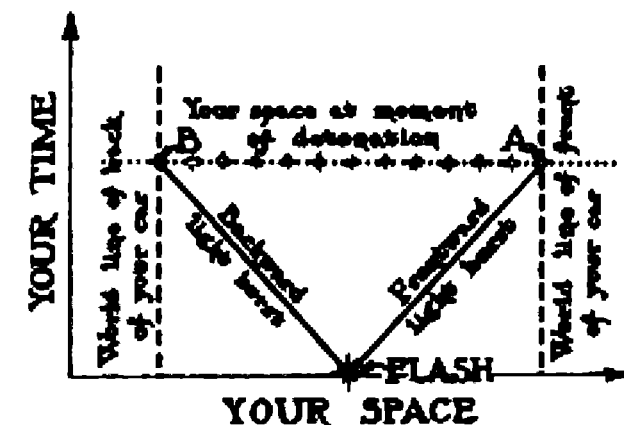
برهان أينشتاين على مزج المكان والزمن

إن مبدأ أينشتاين في سرعة الضوء المطلقة يفرض مزج المكان والزمن؛ بمعنى آخر، إنه يفرض نسبية التزامن: الأحداث المتزامنة كما تراها أنت (والتي تقع في مكانك الخاص

في لحظة محددة من زمنك)، بينما تنطلق سيارتك الرياضية بسرعة في كولورادو بوليفارد، ليست متزامنة كما أراها أنا، في سكون في مركز الشرطة. سأنبت ذلك باستخدام كلمات وصفية تتوافق مع مخططات الزمكان الموضحة أدناه. وهذا الدليل هو في الأساس نفس الدليل الذي ابتكره أينشتاين في عام 1905.

ضع مصباحًا وهاجًا في منتصف سيارتك. قم بتشغيل المصباح. هو يرسل رشقة من الضوء للأمام نحو مقدمة سيارتك، ورشقة للخلف نحو الجزء الخلفي من سيارتك. بما أن الرشقتين تنبعثان في وقت واحد، وبما أنهما تقطعان نفس المسافة التي قستها في سيارتك، وبما أنهما تسيران بنفس السرعة (سرعة الضوء المطلقة)، فيجب أن تصلا إلى الجزء الأمامي والخلفي من سيارتك في وقت واحد من وجهة نظرك؛ انظر الشكل الأيسر أدناه. وبالتالي، فإن حَدَثَي وصول الرشقتين (أطلق عليهما A في مقدمة سيارتك وB في مؤخرتها) متزامنان من وجهة نظرك، ويصادف أنهما يتزامنان مع انفجارات الألعاب النارية في الشكل 1.3، كما تراها أنت.

بعد ذلك، افحص الرشقات الضوئية وأحداث وصولها A وB من وجهة نظري أنا في أثناء مرور سيارتك بسرعة بجانبني؛ انظر الشكل التوضيحي الصحيح أدناه. من وجهة نظري، فإن الجزء الخلفي من سيارتك يتحرك للأمام، نحو رشقة الضوء الموجهة للخلف، وبالتالي يلتقي بعضهما ببعض (الحدث B) في زمن أقرب مما أراه أنا وليس كما تراه أنت. وبالمثل، فإن مقدمة سيارتك تتحرك للأمام، بعيدًا عن الرشقة الموجهة للأمام، وبالتالي يلتقي بعضهما ببعض (الحدث A) لاحقًا، كما رأيت أنا وليس كما رأيت أنت. (تعتمد هذه الاستنتاجات بشكل حاسم على حقيقة أن سرعتي الرشقتين الضوئيتين هما نفساها اللتان رأيتهما؛ أي أنهما تعتمدان على سرعة الضوء المطلقة). لذلك، أعتبر أنا الحدث B قد حدث قبل الحدث A؛ وبالمثل، أرى أنا المفترقات النارية الموجودة بالقرب من الجزء الخلفي من سيارتك تنفجر قبل تلك الموجودة بالقرب من المقدمة.



لاحظ أن مواقع الانفجارات (مكانك أنت في لحظة محددة من زمناك) هي نفسها في مخططات الزمان أعلاه كما في الشكل 1.3. وهذا يبرر المزج المؤكد بين المكان والزمن الذي ناقشناه في النص.

كيف يمكن أن أرى تدفق زمناك يتباطأ، في حين ترى تدفق زمني يتباطأ؟ كيف يكون ذلك ممكناً منطقياً؟ وكيف أرى مكانك ينكمش، وأنت ترى مكاني ينكمش؟ الجواب يكمن في نسبة التزامن. أنا وأنت نختلف حول ما إذا كانت الأحداث في مواقع مختلفة في مكاننا الخاص متزامنة، ويتضح أن هذا الخلاف ينسجم مع خلافتنا حول تدفق الزمن وانكماش المكان بطريقة تجعل كل شيء متسقاً منطقياً. ومع ذلك، فإن إثبات هذا الاتساق سيستغرق صفحات أكثر مما أرغب في إنفاقه، لذا أحيلك للحصول على دليل، إلى الفصل الثالث من كتاب تايلور وويلر (1992).

كيف أننا كبشر لم نلاحظ قط هذا السلوك الغريب للمكان والزمن في حياتنا اليومية؟ الجواب يكمن في بطئنا. نحن نتحرك دائماً بالنسبة إلى بعضنا بسرعات أقل بكثير من سرعة الضوء (299,792 كيلومتراً في الثانية). إذا سارت سيارتك عبر كولورادو بوليفارد بسرعة 150 كيلومتراً في الساعة، يجب أن أرى تدفق الزمن يتمدد، وينكمش المكان بمقدار جزء واحد تقريباً من مائة تريليون ($10^{-14} \times 1$) - وهو أقل بكثير من أن نلاحظه. على النقيض من ذلك، إذا كانت سيارتك ستتجاوزني بسرعة 87 بالمائة من سرعة الضوء، فعندئذ (باستخدام الأدوات التي تستجيب بسرعة كبيرة) يجب أن أرى زمنك يتدفق ببطء أقل مرتين من زمني، في حين ترى أن زمني يتدفق ببطء أقل بمرتين من زمنك؛ وبالمثل، يجب أن أرى كل شيء في سيارتك بنصف طوله، من الشرق إلى الغرب، مقارنة بالأطوال المعتادة، ويجب أن ترى كل شيء في مركز الشرطة الخاص بي بنصف طوله، من الشرق إلى الغرب، مقارنة بالأطوال المعتادة. والواقع أن مجموعة واسعة من التجارب التي أجريت في أواخر القرن العشرين أثبتت أن المكان والزمن يتصرفان بهذه الطريقة على وجه التحديد.

كيف وصل أينشتاين إلى هذا الوصف الثوري للمكان والزمن؟

ليس عن طريق فحص نتائج التجارب. كانت الساعات في عصره غير دقيقة للغاية، بحيث لم تتمكن، في السرعات المنخفضة المتاحة، من إظهار أي تمدد زمني أو خلافاً حول التزامن، وكانت قضايا القياس غير دقيقة للغاية لدرجة أنها لا تساعد على إدراك انكماش الطول. وكانت التجارب الوحيدة ذات الصلة نادرة، مثل تجربة مايكلسون ومورلي، التي اقترحت أن سرعة الضوء على سطح الأرض قد تكون هي نفسها في جميع الاتجاهات. لقد كانت هذه بيانات هزيلة للغاية بالفعل، بحيث لا يمكن الاعتماد عليها في مثل هذه المراجعة الثورية لمفاهيم المرء عن المكان والزمن! بالإضافة إلى ذلك، لم يُولَ أينشتاين سوى القليل من الاهتمام لهذه التجارب.

وبدلاً من ذلك، اعتمد أينشتاين على حدسه الفطري فيما يتعلق بالكيفية التي يجب أن تتصرف بها الأشياء. وبعد الكثير من التفكير، أصبح من الواضح له بشكل بديهي أن سرعة الضوء يجب أن تكون ثابتاً كونياً/ معممًا، مستقلاً عن الاتجاه ومستقلاً عن الحركة. ورأى أنه عندها فقط يمكن جعل قوانين ماكسويل الكهرومغناطيسية بسيطة وجميلة بشكل موحد (على سبيل المثال، «خطوط المجال المغناطيسي التي لا تنتهي أبداً»)، وكان على

قناعة راسخة بأن الكون يصر بشكل ما على أن تكون قوانينه بسيطة وجميلة. ولذلك فقد قدّم، كمبدأ جديد تقوم عليه الفيزياء كلها، مبدأه المطلق لسرعة الضوء.

وهذا المبدأ في حد ذاته، من دون أي شيء آخر، يضمن بالفعل أن صرح القوانين الفيزيائية المبنية على أسس أينشتاين سوف يختلف اختلافاً عميقاً عن أساس نيوتن. يضطر الفيزيائي الذي يستخدم فيزياء نيوتن، بافتراض أن المكان والزمن مطلقان، إلى استنتاج أن سرعة الضوء نسبية، فهي تعتمد على حالة حركة الفرد (كما يظهر تشبيه الطائر والقطار في وقت سابق من هذا الفصل). أينشتاين، من خلال افتراض أن سرعة الضوء مطلقة، اضطر إلى استنتاج أن المكان والزمن نسيبان، ويعتمدان على حالة الحركة. بعد أن استنتج أن المكان والزمن نسيبان، قدم أينشتاين بعد ذلك من خلال بحثه عن البساطة والجمال مبدأ النسبية الخاصة: لا ينبغي تفضيل أي حالة من حالات الحركة على أي حالة أخرى؛ يجب أن تكون جميع حالات الحركة متساوية في نظر القانون الفيزيائي / المادي.

لم تكن التجربة غير مهمة في بناء أينشتاين لأساس جديد للفيزياء فحسب، بل كانت أفكار الفيزيائيين الآخرين أيضاً غير مهمة. لم يؤل سوى القليل من الاهتمام لعمل الآخرين. ويبدو أنه لم يقرأ حتى أياً من المقالات العلمية المهمة حول المكان والزمن والأثير التي كتبها هندريك لورنتز، وهنري بوانكاريه، وجوزيف لارمور، وآخرون بين عامي 1896 و1905.

في مقالاتهم، كان لورنتز وبوانكاريه ولارمور يتلمسون طريقهم نحو نفس المراجعة لمفاهيمنا عن المكان والزمن مثل أينشتاين، لكنهم كانوا يتلمسون طريقهم عبر ضباب من المفاهيم الخاطئة التي فرضتها عليهم فيزياء نيوتن. وعلى النقيض من ذلك، كان أينشتاين قادراً على التخلص من مفاهيم فيزياء نيوتن الخاطئة. إن قناعته بأن الكون يحب البساطة والجمال، واستعداده للاسترشاد بهذه القناعة، حتى لو كان ذلك يعني تدمير أسس فيزياء نيوتن، قاده بوضوح فكري لا يستطيع الآخرون مضاهاته، إلى وصفه الجديد للمكان والزمن.

وسيلعب مبدأ النسبية دوراً مهماً لاحقاً في هذا الكتاب. ولهذا السبب سأخصص بضعة صفحات لشرح أعمق لها.

يتطلب التفسير الأعمق مفهوم الإطار المرجعي. الإطار المرجعي هو مختبر يحتوي

على جميع أجهزة القياس التي قد يحتاج إليها المرء لأي قياسات يرغب في إجرائها. يجب أن يتحرك المختبر وجميع أجهزته عبر الكون معاً؛ يجب أن يخضعوا جميعاً لنفس الحركة. في الواقع، حركة الإطار المرجعي هي قضية مركزية. عندما يتحدث الفيزيائي عن «أطر مرجعية مختلفة»، فإن التركيز يكون على حالات الحركة المختلفة وليس على أجهزة القياس المختلفة في المختبرين.

ليس من الضروري أن يكون مختبر الإطار المرجعي وأجهزته حقيقيين. يمكن أن تكون هذه أبنية خيالية، موجودة فقط في ذهن الفيزيائي الذي يريد أن يطرح بعض الأسئلة، مثل: «إذا كنت في مركبة فضائية تطفو عبر حزام الكويكبات، وكان عليّ قياس حجم كويكب معين، فماذا سيكون الجواب؟»، يتخيل هؤلاء الفيزيائيون أنفسهم وكأن لديهم إطاراً مرجعياً (مختبراً) متصلاً بمركبتهم الفضائية، فيستخدمون أجهزة هذا الإطار لإجراء القياسات.

عبر أينشتاين عن مبدأ النسبية ليس من خلال أطر مرجعية عشوائية، بل من خلال أطر خاصة إلى حد ما: أطر (مختبرات) تتحرك بحرية تحت تأثير قصورها الذاتي، لا تدفعها أو تسحبها أي قوى، وبالتالي تستمر دائماً للأمام في نفس حالة الحركة المنتظمة كما بدأت. هذه الأطارات أطلق عليها أينشتاين اسم الإطار المرجعي القصوري لأن حركتها تخضع فقط لقصورها الذاتي.

الإطار المرجعي المتصل بصاروخ مطلق (مختبر داخل الصاروخ) ليس إطاراً مرجعياً قصورياً، لأن حركته تتأثر بدفع الصاروخ وكذلك بقصوره الذاتي. يمنع دفع الصاروخ حركة الإطار من أن تكون متسقة. إن الإطار المرجعي المرتبط بالمكوك الفضائي في أثناء عودته إلى الغلاف الجوي للأرض ليس أيضاً إطاراً مرجعياً قصورياً، لأن الاحتكاك بين هيكل المكوك وجزيئات هواء الأرض تبطئ المكوك، مما يجعل حركته غير متسقة.

والأهم من ذلك، أنه بالقرب من أي جسم ضخم مثل الأرض، تسحب الجاذبية كل الأطارات المرجعية. لا توجد طريقة على الإطلاق لحماية الإطار المرجعي (أو أي جسم آخر) من جاذبية الجاذبية. لذلك، من خلال التقيد بأطر القصور الذاتي، منع أينشتاين نفسه في عام 1905 من النظر في المواقف الفيزيائية التي تكون فيها الجاذبية مهمة³؛ في الواقع، جعل كوننا مثاليًا باعتباره عالمًا لا توجد فيه جاذبية على الإطلاق. تعتبر هذه المثالية

المتطرفة أمراً أساسياً للتقدم في الفيزياء؛ يتخلص المرء في الناحية النظرية من جوانب الكون التي يصعب التعامل معها، وفقط بعد اكتساب السيطرة الفكرية على الجوانب المتبقية الأسهل، يمكن للمرء العودة إلى الجوانب الأصعب. اكتسب أينشتاين سيطرة فكرية على كون مثالي من دون جاذبية في عام 1905. ثم تحول بعد ذلك إلى المهمة الأصعب المتمثلة في فهم طبيعة المكان والزمن في كوننا الحقيقي الذي يتمتع بالجاذبية، وهي المهمة التي أجبرته في النهاية على استنتاج أن الجاذبية تشوه المكان والزمن (الفصل الثاني).

بعد فهم مفهوم الإطار المرجعي القصوري، أصبحنا الآن جاهزين لصياغة أعمق وأكثر دقة لمبدأ النسبية لأينشتاين: صياغة أي قانون في الفيزياء من حيث القياسات التي أجريت في إطار مرجعي قصوري. ومن ثم، عند إعادة صياغته من حيث القياسات في أي إطار قصوري آخر، يجب أن يتخذ قانون الفيزياء نفس الشكل الرياضي والمنطقي تمامًا كما في الإطار الأصلي. بمعنى آخر، يجب ألا توفر قوانين الفيزياء أي وسيلة للتمييز بين إطار مرجعي قصوري (حالة محددة من الحركة المنتظمة) عن أي إطار آخر.

هناك مثالان للقوانين الفيزيائية سيجعلان هذا الأمر أكثر وضوحًا:

• «أي جسم حر (جسم لا تؤثر عليه أي قوى) والذي كان في البداية في حالة سكون في إطار مرجعي قصوري سيظل دائمًا في حالة سكون؛ وأي جسم حر يتحرك في البداية عبر إطار مرجعي قصوري سوف يستمر إلى الأبد للأمام، على طول خط مستقيم وبسرعة ثابتة». إذا كان لدينا (كما هي الحال) سبب قوي للاعتقاد بأن هذه النسخة النسبية من قانون نيوتن الأول للحركة صحيحة في إطار مرجعي قصوري واحد على الأقل، فإن مبدأ النسبية يصير على أنه يجب أن تكون صحيحة في جميع الأطر المرجعية القصورية بصرف النظر عن مكان وجودها في الكون وبصرف النظر عن مدى سرعة حركتها.

• يجب أن تتخذ قوانين ماكسويل للكهر ومغناطيسية نفس الشكل الرياضي في جميع الأطر المرجعية. لقد فشلت في ذلك عندما بُنيت الفيزياء على أسس فيزياء نيوتن (يمكن أن يكون لخطوط المجال المغناطيسي نهايات في بعض الإطارات ولكن ليس في إطارات أخرى)، وكان هذا الفشل مزعجًا للغاية للورنتز، وبوانكاريه، ولارمور، وأينشتاين.

من وجهة نظر أينشتاين، كان من غير المقبول على الإطلاق أن تكون القوانين بسيطة

وجميلة في إطار واحد، وهو إطار الأثير، ولكنها معقدة وقبيحة في جميع الإطارات التي تتحرك بالنسبة إلى الأثير. من خلال إعادة بناء أسس الفيزياء، مكن أينشتاين قوانين ماكسويل من اتخاذ نفس الشكل البسيط والجميل (على سبيل المثال، «خطوط المجال المغناطيسي لا يكون لها أي نهايات أبدًا») في كل إطار مرجعي قصوري - بما يتوافق مع مبدئه للنسبية.

إن مبدأ النسبية هو في الواقع مبدأ فوقي بمعنى أنه ليس في حد ذاته قانونًا في الفيزياء، ولكنه بدلًا من ذلك نمط أو قاعدة يجب (كما أكد أينشتاين) أن تطيعها جميع قوانين الفيزياء، بصرف النظر عن تلك القوانين. بصرف النظر عما إذا كانت قوانين تحكم الكهرباء والمغناطيسية، أو الذرات والجزيئات، أو المحركات البخارية والسيارات الرياضية. قوة هذا المبدأ الوصفي مذهلة. ويجب اختبار كل قانون جديد مقترح باستخدام النسبية. إذا نجح القانون الجديد في الاختبار (إذا كان القانون هو نفسه في كل إطار مرجعي قصوري)، فإن لدى القانون بعض الأمل في وصف سلوك كوننا. وأكد أينشتاين أنه إذا فشل في الاختبار، فليس لديه أمل. يجب رفضه.

وتشير كل تجاربنا على مدى ما يقرب من 100 عام منذ عام 1905 إلى أن أينشتاين كان على حق. جميع القوانين الجديدة التي نجحت في وصف الكون الحقيقي تبين أنها تطيع مبدأ النسبية لأينشتاين. لقد أصبح هذا المبدأ الفوقي مكرسًا باعتباره حاكمًا للقانون الفيزيائي.

في مايو 1905، عندما كسرت مناقشاته مع ميكلانجيلو بيسو انغلاقه العقلي ومكنته من التخلي عن الزمن والمكان المطلقين، لم يحتج أينشتاين سوى بضعة أسابيع من التفكير والحساب لصياغة أساسه الجديد للفيزياء، واستنتاج تبعاته على الفيزياء. طبيعة المكان والزمن والكهرومغناطيسية وسلوكيات الأجسام عالية السرعة. وكانت اثنتان من النتائج مذهلتين: يمكن تحويل الكتلة إلى طاقة (والتي ستصبح أساس القنبلة الذرية؛ انظر الفصل السادس)، ويجب أن يزداد القصور الذاتي لكل جسم بسرعة كبيرة، حين تقترب سرعته من سرعة الضوء، بحيث - بصرف النظر عن مدى قوة ضغط الشخص على الجسم - لا يمكن أبدًا جعله يصل إلى سرعة الضوء أو يتجاوزها («لا شيء يمكن أن يسير أسرع من الضوء»)⁴.

في أواخر يونيو، كتب أينشتاين مقالاً علمياً يصف فيه أفكاره وعواقبها، وأرسله بالبريد إلى حولية الفيزياء. حمل مقاله عنواناً عادياً إلى حد ما: «عن الديناميكا الكهربائية للأجسام المتحركة». لكنه كان بعيداً كل البعد عن أن يكون عادياً. أظهرت دراسة سريعة أن أينشتاين، «الخبير الفني من الدرجة الثالثة» في مكتب براءات الاختراع السويسري، يقترح أساساً جديداً تماماً للفيزياء، ويقترح مبدأً فوقياً يجب أن تلتزم به جميع القوانين الفيزيائية المستقبلية، ويراجع بشكل جذري مفاهيمنا عن المكان والزمن، ويستنتج نتائج مذهلة. إن أساس أينشتاين الجديد وعواقبه سيُعرفان قريباً باسم النسبية الخاصة («خاصة») لأنها تصف الكون بشكل صحيح فقط في تلك المواقف الخاصة حينما تكون الجاذبية غير مهمة).

استلمت حولية الفيزياء مقال أينشتاين في مكاتبها في لايبزج في 30 يونيو 1905. وروجع للتأكد من دقته وأهميته من قبل أحد المحكمين، ونجح باعتباره مقبولاً، ثم نُشر. وفي الأسابيع التي تلت النشر، انتظر أينشتاين بفارغ الصبر ردّاً من علماء الفيزياء العظماء في ذلك الوقت. كانت وجهة نظره واستنتاجاته ثوريتين للغاية ولم يكن لهما سوى القليل من الأساس التجريبي، لدرجة أنه توقع انتقادات حادة وجدلاً. وبدلاً من ذلك، قوبل بصمت رهيب. أخيراً، بعد عدة أسابيع، وصلت رسالة من برلين: يريد ماكس بلانك توضيحاً لبعض المشكلات العلمية في الورقة. سعد أينشتاين أيما سعادة! لقد لفت انتباه بلانك، وهو أحد أشهر علماء الفيزياء الأحياء، إنه أمر مُرضٍ للغاية. وعندما واصل بلانك، في العام التالي، استخدام مبدأ النسبية لأينشتاين كأداة مركزية في بحثه، شعر أينشتاين بمزيد من التشجيع. إن موافقة بلانك، والموافقة التدريجية من علماء الفيزياء البارزين الآخرين، والأهم من ذلك ثقته العالية بنفسه، جعلت أينشتاين ثابتاً طوال العشرين عاماً التالية، حيث أصبح الجدل الذي توقعه يدور بالفعل حول نظريته النسبية. ولا يزال الجدل قوياً في عام 1922، لدرجة أنه عندما أبلغ أينشتاين عن طريق سكرتير الأكاديمية السويدية للعلوم ببرقية أنه فاز بجائزة نوبل، ذكرت البرقية صراحة أن النسبية ليست من بين الأعمال التي استندت إليها الجائزة.

انتهى الجدل أخيراً في ثلاثينيات القرن العشرين، عندما أصبحت التكنولوجيا متقدمة بما يكفي لإنتاج عمليات تحقق تجريبية دقيقة لتنبؤات النسبية الخاصة. في الوقت الحالي، في التسعينيات، ليس هناك مجال للشك على الإطلاق: كل يوم، يدفع أكثر من

10^{17} إلكترون في سرعات الجسيمات في جامعة ستانفورد، وجامعة كورنيل، وأماكن أخرى، إلى سرعات تصل إلى 0.9999999995 من سرعة الضوء -وتثبت سلوكياتها عند هذه السرعات الفائقة أنها تتوافق تمامًا مع قوانين الفيزياء النسبية الخاصة لأينشتاين. على سبيل المثال، يزداد قصور الإلكترونات عندما تقترب من سرعة الضوء، مما يمنعها من الوصول إلى سرعة الضوء تمامًا؛ وعندما تصطدم الإلكترونات بالأهداف، فإنها تنتج جسيمات عالية السرعة تسمى الميزونات التي تعيش لمدة 2.22 ميكروثانية فقط بمقاييسها الزمنية الخاصة، ولكن بسبب تمدد الزمن تعيش لمدة 100 ميكروثانية أو أكثر بالمقاييس الزمنية للفيزيائيين الموجودين في حالة سكون في المختبر.

طبيعة القانون الفيزيائي

هل يعني نجاح النسبية الخاصة لأينشتاين أننا يجب أن نتخلى تمامًا عن قوانين فيزياء نيوتن؟
من الواضح أنه لا.

ولا تزال قوانين نيوتن تُستخدم على نطاق واسع في الحياة اليومية، وفي معظم مجالات العلوم، وفي معظم التكنولوجيا. نحن لا ننتبه إلى تمدد الزمن عند التخطيط لرحلة بالطائرة، ولا يقلق المهندسون بشأن انكماش الطول عند تصميم الطائرة. إن التمدد والانكماش أصغر بكثير من أن يثير القلق.

وبطبيعة الحال، إذا أردنا ذلك، يمكننا استخدام قوانين أينشتاين بدلاً من قوانين نيوتن في الحياة اليومية. يقدم الاثنان نفس التنبؤات تقريبًا لجميع التأثيرات الفيزيائية، نظرًا لأن الحياة اليومية تتطلب سرعات نسبية صغيرة جدًا مقارنة بسرعة الضوء.

تبدأ تنبؤات أينشتاين ونيوتن بالتباعد بقوة فقط عند السرعات النسبية التي تقترب من سرعة الضوء. وعندها فقط يجب على المرء أن يتخلى عن تنبؤات نيوتن ويلتزم بشكل صارم بتنبؤات أينشتاين.

وهذا مثال لنمط عام جدًا، سنلتقي به مرة أخرى في الفصول القادمة. إنه النمط الذي تكرر مرارًا وتكرارًا في تاريخ فيزياء القرن العشرين: مجموعة واحدة من القوانين (في حالتنا، القوانين فيزياء نيوتن) التي قبلت على نطاق واسع في البداية، لأنها تتفق بشكل

جميل مع التجربة. ولكن بعد ذلك تصبح التجارب أكثر دقة، ويتبين أن هذه المجموعة الأولى من القوانين تعمل بشكل جيد فقط في مجال محدود، وهو مجال صلاحيتها (بالنسبة إلى قوانين نيوتن، مجال السرعات الصغيرة مقارنة بسرعة الضوء). ثم يكافح الفيزيائيون، تجريبيًا ونظريًا، لفهم ما يحدث عند حدود الصحة لهذا المجال، ويصوغون أخيرًا مجموعة جديدة من القوانين التي حققت نجاحًا كبيرًا داخل هذه الحدود وبالقرب منها وخارجها (في حالة نيوتن، قانون أينشتاين النسبية الخاصة، صالحة عند السرعات القريبة من الضوء وكذلك عند السرعات المنخفضة). ثم تتكرر العملية. سنلتقي بال تكرار في الفصول القادمة: فشل النسبية الخاصة عندما أصبحت الجاذبية مهمة، واستبدل بها مجموعة جديدة من القوانين تسمى النسبية العامة (الفصل الثاني)؛ فشل النسبية العامة بالقرب من المفردة داخل الثقب الأسود، واستبدل بها مجموعة جديدة من القوانين تسمى الجاذبية الكمومية (الفصل الثالث عشر).

كانت هناك سمة مذهلة في كل انتقال من مجموعة قديمة من القوانين إلى مجموعة جديدة: في كل حالة، لم يكن الفيزيائيون (إذا كانوا أذكاء بما فيه الكفاية) بحاجة إلى أي توجيه تجريبي لإخبارهم أين ستبدأ المجموعة القديمة في الانهيار؛ أي أن تخبرهم بحدود مجال صلاحيتها. لقد رأينا هذا بالفعل بالنسبة إلى فيزياء نيوتن: لم تتوافق قوانين ماكسويل للديناميكا الكهربائية بشكل جيد مع المكان المطلق لفيزياء نيوتن. في حالة السكون في المكان المطلق (في إطار الأثير)، كانت قوانين ماكسويل بسيطة وجميلة - على سبيل المثال، خطوط المجال المغناطيسي ليست لها نهايات. في الإطارات المتحركة، أصبحت معقدة وقيحية، حيث إن خطوط المجال المغناطيسي لها نهايات في بعض الأحيان. ومع ذلك، كان للمضاعفات تأثير ضئيل على نتائج التجارب عندما تحركت الإطارات، نسبة إلى الفضاء المطلق، بسرعات صغيرة مقارنة بالضوء؛ عندها تصبح جميع خطوط المجال تقريبًا لا نهاية لها. فقط عند السرعات التي تقترب من الضوء، توقع الجميع أن للتعقيدات القبيحة تأثيرًا كبيرًا بما يكفي لقياسها بسهولة: الكثير من النهايات. وبالتالي، أصبح من المعقول الشك - حتى من دون تجربة مايكلسون-مورلي - في أن مجال صحة فيزياء نيوتن قد تكون سرعات صغيرة مقارنة بالضوء، وأن قوانين نيوتن قد تنهار عند سرعات تقترب من الضوء.

وفي الفصل الثاني سنرى، بالمثل، كيف تتنبأ النسبية الخاصة بفشلها في وجود

الجاذبية؛ وفي الفصل الثالث عشر، كيف تتنبأ النسبية العامة بفشلها بالقرب من المفردة. عند التفكير في التسلسل المذكور أعلاه من مجموعات القوانين (فيزياء نيوتن، والنسبية الخاصة، والنسبية العامة، والجاذبية الكمومية) -وتسلسل مماثل من القوانين التي تحكم بنية المادة والجسيمات الأولية- فإن معظم علماء الفيزياء مدفوعون إلى الاعتقاد بأن هذه التسلسلات تقارب نحو مجموعة من القوانين النهائية التي تحكم الكون في الحقيقة، القوانين التي تجبر الكون على التصرف بالطريقة التي يتصرف بها، والتي تجبر المطر على التكثف على النوافذ، وتجبر الشمس على حرق الوقود النووي، وتجبر الثقوب السوداء على إنتاج موجات الجاذبية عندما تصطدم، وهلم جرًا.

قد يعترض المرء على أن كل مجموعة من القوانين في التسلسل «تبدو» مختلفة تمامًا عن المجموعة السابقة. (على سبيل المثال، يبدو الزمن المطلق في فيزياء نيوتن مختلفًا تمامًا عن التدفقات الزمنية المختلفة في النسبية الخاصة). وفي «نظرات» القوانين لا توجد علامة على الإطلاق على التقارب. لماذا إذن نتوقع التقارب؟ الجواب هو أنه يجب على المرء أن يميز بشكل حاد بين التنبؤات التي تقدمها مجموعة من القوانين والصور الذهنية التي تنقلها القوانين (كيف تبدو القوانين). وأتوقع التقارب فقط من حيث التوقعات، ولكن هذا هو كل ما يهم في نهاية المطاف. إن الصور الذهنية (زمن مطلق واحد في فيزياء نيوتن مقابل تدفقات زمنية عديدة في الفيزياء النسبية) ليست مهمة بالنسبة إلى الطبيعة النهائية للواقع. في الواقع، من الممكن تغيير الشكل الذي «تبدو عليه» مجموعة القوانين بالكامل من دون تغيير توقعاتها. وفي الفصل الحادي عشر، سأناقش هذه الحقيقة الرائعة وأعطي الأمثلة، وسأشرح آثارها على طبيعة الواقع.

لماذا أتوقع التقارب من ناحية التوقعات؟ لأن كل الأدلة التي لدينا تشير إلى ذلك. تتمتع كل مجموعة من القوانين بمجال صلاحية أكبر من المجموعات التي سبقتها: تعمل قوانين نيوتن في جميع أنحاء مجال الحياة اليومية، ولكن ليس في سرعات الجسيمات التي صنعها الفيزيائيون، وليس في الأجزاء الغريبة من الكون البعيد، مثل النجوم النابضة، والنجوم الزائفة، والثقوب السوداء. تعمل قوانين النسبية العامة لأينشتاين في كل مكان في مختبراتنا، وفي كل مكان في الكون البعيد، باستثناء أعماق الثقوب السوداء وفي الانفجار الأعظم حين وُلد الكون؛ قد يتبين أن قوانين الجاذبية الكمومية (التي لم نفهمها جيدًا بعد) تعمل في كل مكان على الإطلاق.

خلال هذا الكتاب، سأبني، من دون اعتذار، وجهة النظر القائلة بوجود مجموعة نهائية من القوانين الفيزيائية (التي لا نعرفها حتى الآن ولكنها قد تكون الجاذبية الكمومية)، وأن هذه القوانين في الحقيقة تحكم الكون من حولنا في كل مكان. إنها تجبر الكون على التصرف بالطريقة التي يتصرف بها. عندما أكون دقيقًا للغاية، سأقول إن القوانين التي نعمل بها الآن (على سبيل المثال، النسبية العامة) هي «تقريب» أو «وصف تقريبي للقوانين الحقيقية». ومع ذلك، عادةً ما أسقط الأسباب التي أهلت لذلك ولا أميز بين القوانين الحقيقية وتقريباتنا لها. في هذه الأوقات، سأؤكد، على سبيل المثال، أن «قوانين النسبية العامة [بدلاً من القوانين الحقيقية] تجبر الثقب الأسود على الإمساك بالضوء بقوة في قبضته بحيث لا يستطيع الضوء الهروب من أفق الثقب». هذه هي الطريقة التي نفكر بها أنا وزملائي كفيزيائيين، عندما نكافح من أجل فهم الكون. إنها طريقة مثمرة للتفكير؛ لقد ساعدت في إنتاج رؤى جديدة وعميقة حول النجوم المتفجرة، والثقوب السوداء، وموجات الجاذبية، وغيرها من الظواهر.

تعارض وجهة النظر هذه مع وجهة النظر الشائعة القائلة بأن الفيزيائيين يعملون بنظريات تحاول وصف الكون، ولكنها مجرد اختراعات بشرية وليس لها أي سلطة حقيقية على الكون. في الواقع، كلمة نظرية محملة بدلالات التردد والغرابة الإنسانية لدرجة أنني سأجنب استخدامها بقدر الإمكان. وسأستخدم بدلاً منها عبارة القانون الفيزيائي بدالاتها الثابتة المتمثلة في حكم الكون؛ أي إجبار الكون على التصرف كما يفعل.

1. القراء الذين يرغبون في فهم المقصود بـ «التلاعب رياضياً» بقوانين الفيزياء، سيجدون مناقشة حول الموضوع في قسم الملاحظات في نهاية الكتاب.
2. الفصل العاشر.
3. هذا يعني أنه من الظلم بعض الشيء مني أن أستخدم سيارة رياضية عالية السرعة، والتي تشعر بجاذبية الأرض، في مثالي أعلاه. ومع ذلك، فقد تبين أنه نظرًا لأن قوة جاذبية الأرض متعامدة مع اتجاه حركة السيارة (لأسفل مقابل الأفقي)، فليس لها أي تأثير على أي من القضايا التي ناقشناها في قصة السيارة الرياضية.
4. لكن انظر الفصل الرابع عشر للحصول على تحذير.

الفصل الثاني: اعوجاج المكان والزمن

والذي فيه سيوحّد هيرمان مينكوفسكي المكان والزمن،
وأينشتاين يشوههما.

الزمكان المطلق لمينكوفسكي

إن وجهات النظر حول المكان والزمن التي أود أن أعرضها أمامكم قد انبثقت من تربة الفيزياء التجريبية، وهنا تكمن قوتها. إنها ثورية. ومن الآن فصاعداً، فإن المكان في حد ذاته، والزمن في حد ذاته، محكوم عليهما بالفناء، ولن يحافظ على وجوده إلا نوع من الاتحاد بين الاثنين في واقع مستقل.

بهذه الكلمات كشف هيرمان مينكوفسكي للعالم، في سبتمبر 1908، عن اكتشاف جديد حول طبيعة المكان والزمن.

لقد أثبت أينشتاين أن المكان والزمن «نسبيان». يختلف طول الكائن وتدفق الزمن عند رؤيته من إطارات مرجعية مختلفة. يختلف زمني عن زمئك إذا تحركت إليك، ويختلف مكاني عن مكانك. زمني هو مزيج من زمئك ومكانك؛ مكاني هو مزيج من مكانك وزمئك. اكتشف مينكوفسكي، بناءً على عمل أينشتاين، أن الكون يتكون من نسيج «الزمكان» رباعي الأبعاد، وهو نسيج مطلق وليس نسبياً. هذا النسيج رباعي الأبعاد هو نفسه. كما يُرى من جميع الأطر المرجعية (إذا كان بإمكان المرء فقط أن يتعلم كيفية «رؤيته»؛ إنه موجود بشكل مستقل عن الأطر المرجعية.

توضح الحكاية التالية (مقتبسة من تايلور وويلر، 1992) الفكرة الكامنة وراء اكتشاف مينكوفسكي.

في يوم من الأيام، على جزيرة تدعى مليدينا في البحر الشرقي البعيد، عاش شعب ذو عادات ومحرمات غريبة. في شهر يونيو من كل عام، في أطول يوم في السنة، يسافر جميع رجال مليدينا في سفينة شراعية ضخمة إلى جزيرة مقدسة بعيدة تسمى سيرونا للتواصل مع ضفدع ضخم. طوال الليل يسحرهم الضفدع بحكايات رائعة عن النجوم والمجرات والنجوم النابضة والنجوم الزائفة. في اليوم التالي، سيجر الرجال عائدين إلى مليدينا، مليئين بالإلهام الذي يدعمهم طوال العام التالي.

في شهر ديسمبر من كل عام، في أطول ليلة في العام، تبحر نساء مليدينا إلى سيرونا، ويتحدثن مع نفس الضفدع طوال اليوم التالي، ويعدن في الليلة التالية، مستلهمات رؤى الضفدع للنجوم والمجرات والنجوم الزائفة والنجوم النابضة.

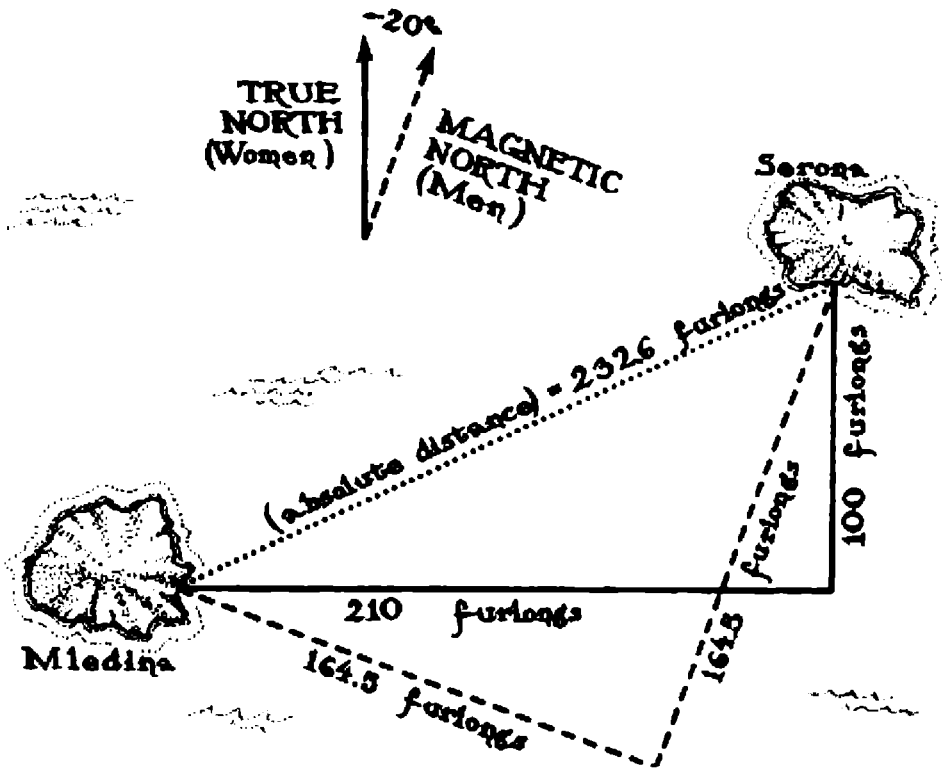
الآن، أصبح من المحظور تمامًا على أي امرأة في مليدينا أن تصف لأي رجل من مليدينا رحلتها إلى جزيرة سيرونا المقدسة، أو أي تفاصيل عن حكايات الضفدع. ورجال مليدينا محكومون بنفس المحرمات. يجب عليهم ألا يكشفوا أبدًا لأي امرأة أي شيء عن رحلتهم السنوية.

في صيف عام 1905، اكتشف شاب مليديني متطرف يُدعى ألبرت - ولم يكن يهتم كثيرًا بالمحظورات في ثقافته - خريطتين مقدستين وكشفهما لجميع المليدينيين، إنأًا وذكورًا، إنهما خريطتان مقدستان. إحداهما كانت الخريطة التي أرشدت بها كاهنة مليدينا السفينة الشراعية في رحلة النساء في منتصف الشتاء. أما الخريطة الأخرى فكانت الخريطة التي استخدمها كاهن مليدينا في رحلة الرجال في منتصف الصيف. يا له من عار شعر به الرجال بعد أن انكشفت خريطتهم المقدسة! ولم يكن عار النساء أقل. لكن الخريطتين موجودتان ليراهما الجميع، احتوتا على صدمة كبيرة: لقد اختلفوا حول موقع سيرونا. بينما تبحر النساء شرقًا 210 فراسخ، ثم شمالًا 100 فرسخ، يبحر الرجال شرقًا 164.5 فرسخ، ثم شمالًا 164.5 فرسخ. كيف ذلك؟ إن التقليد الديني راسخ. على النساء والرجال أن يحصلوا على إلهامهم السنوي من نفس الضفدع المقدس الموجود على نفس جزيرة سيرونا المقدسة.

تعامل معظم المليدينيين مع عارهم من خلال التظاهر بأن الخريطتين المكشوفتين مزيفتان. لكن رجلًا عجوزًا حكيماً من مليدينا يُدعى هيرمان صدق ذلك. لمدة ثلاث

سنوات ناضل من أجل فهم سر التناقض في الخريطين. أخيراً، في أحد أيام خريف عام 1908، توصل إلى الحقيقة: لا بد أن رجال مليدينا يبحرون بواسطة بوصلة مغناطيسية، ونساء مليدينا يبحرن بواسطة النجوم (الشكل 2.1). رجال مليدينا يحسبون الشمال والشرق مغناطيسياً، وتحسب نساء مليدينا باستخدام دوران الأرض الذي يجعل النجوم تدور فوق رؤوسهن، واختلفت طريقتا الحساب بمقدار 20 درجة. عندما أبحر الرجال باتجاه الشمال - كما حسبوا - كانوا في الواقع يبحرون «20 درجة شمالاً شرقاً»، أو نحو 80 بالمائة شمالاً و20 بالمائة شرقاً، كما حسبت النساء. وبهذا المعنى، كان شمال الرجال خليطاً من شمال النساء وشرقهن، وكذلك شمال النساء خليطاً من شمال الرجال وغربهم. المفتاح الذي قاد هيرمان إلى هذا الاكتشاف هو صيغة فيثاغورس: خذ ساقي مثلث قائم الزاوية؛ قم بتربيع طول إحدى الساقين، وتربيع طول الساق الأخرى، ثم أضفهما، ثم خذ الجذر التربيعي. يجب أن تكون النتيجة طول وتر المثلث.

الوتر هو المسار المستقيم من مليدينا إلى سيرونا. المسافة المطلقة على طول هذا المسار المستقيم $\sqrt{100^2 + 210^2} = 232.6$ فرسخ كما حسبها باستخدام خريطة النساء حيث تكون أرجلهن على طول الشرق الحقيقي والشمال الحقيقي. كما حسبها باستخدام خريطة الرجال مع أرجلهم على طول الشرق المغناطيسي والشمال المغناطيسي، كانت المسافة المطلقة $\sqrt{164.5^2 + 164.5^2}$ فرسخ. كانت المسافة شرقاً والمسافة شمالاً «نسبية»؛ لقد اعتمدوا على ما إذا كان الإطار المرجعي للخريطة مغناطيسياً أم حقيقياً. ولكن من أي زوج من المسافات النسبية يمكن للمرء حساب نفس المسافة المطلقة للخط المستقيم؟



2.1 خريطة الطريق من مليدينا إلى سيرونا متر اكيثان بعضهما فوق بعض، بالإضافة إلى ملاحظات هيرمان للشمال المغناطيسي والشمال الحقيقي والمسافة المطلقة.

لا يسجل التاريخ كيف استجاب سكان مليدينا، بثقافتهم المحظورة، لهذا الاكتشاف الرائع.

كان اكتشاف هيرمان مينكوفيسكي مشابهًا لاكتشاف هيرمان الميليديني: لنفترض أنك تتحرك بالنسبة إليّ (على سبيل المثال، في سيارتك الرياضية فائقة السرعة). ثم:

- تمامًا كما أن الشمال المغناطيسي هو مزيج من الشمال الحقيقي والشرق الحقيقي، كذلك فإن زمني أنا أيضًا هو مزيج من زمئك أنت ومكانك أنت.
- تمامًا كما أن الشرق المغناطيسي هو مزيج من الشرق الحقيقي والجنوب الحقيقي، كذلك فإن مكاني أيضًا هو مزيج من مكاني وزمئك.

• تمامًا كما أن الشمال والشرق المغناطيسيين، والشمال والشرق الحقيقيين، هي مجرد طرق مختلفة لإجراء قياسات على سطح ثنائي الأبعاد موجود سابقًا - سطح

الأرض - كذلك فإن مكاني أنا وزماني أنا، ومكانك أنت وزمانك أنت، هي أيضًا مجرد طرق مختلفة لإجراء قياسات على «سطح» أو «قماش» رباعي الأبعاد موجود سابقًا، وهو ما أطلق عليه مينكوفسكي اسم الزمكان.

• نَمَامًا كما أن هناك مسافة خط مستقيم مطلقة على سطح الأرض من ميليدنا إلى سبرونا، يمكن حسابها من صيغة فيثاغورس باستخدام إما المسافات على طول الشمال المغناطيسي والشرق، أو المسافات على طول الشمال والشرق الحقيقيين، كذلك أيضًا بين أي حدثين في الزمكان هناك فاصل زمني مستقيم مطلق يمكن حسابه من نظير لصيغة فيثاغورس باستخدام الأطوال والأزمنة المَقِيَّسة في أي من الإطارات المرجعية، سواء الخاصة بي أو الخاصة بك.

لقد كان هذا التقارب لصيغة فيثاغورس (سأسميها صيغة مينكوفسكي) هو الذي قاد هيرمان مينكوفسكي إلى اكتشافه للزمكان المطلق.

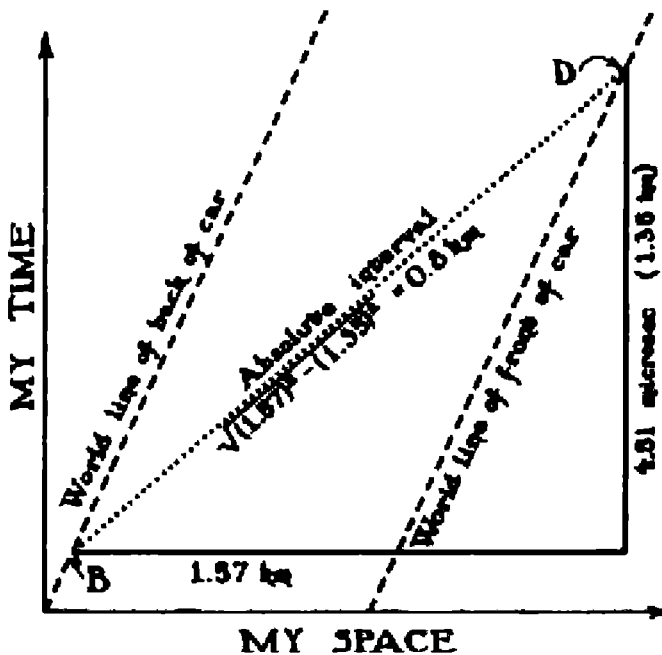
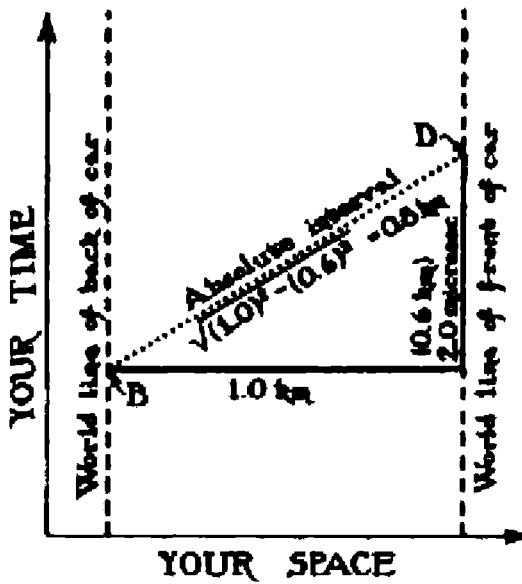
لن تكون تفاصيل صيغة مينكوفسكي مهمة في بقية هذا الكتاب. ليست هناك حاجة إلى إتقانها (على الرغم من أنها موضحة للقراء الذين لديهم فضول في الإطار 2.1). الشيء الوحيد المهم هو أن الأحداث في الزمكان مماثلة لنقاط في المكان، وهناك فاصل زمني مطلق بين أي حدثين في الزمكان مماثل تمامًا لمسافة الخط المستقيم بين أي نقطتين على ورقة مسطحة. إن حقيقة أن هذا الفاصل مطلق (حقيقة أن قيمته هي نفسها، بصرف النظر عن الإطار المرجعي المستخدم لحسابه) توضح أن الزمكان له حقيقة مطلقة؛ إنه نسيج رباعي الأبعاد له خصائص مستقلة عن حركة الفرد.

الإطار 2.1

صيغة مينكوفسكي

لقد تجاوزتني في سيارة رياضية قوية يبلغ طولها كيلومترًا واحدًا، وبسرعة 162 ألف كيلومتر في الثانية (54 بالمائة من سرعة الضوء)؛ تذكر الشكل 1.3. تظهر حركة سيارتك في مخططات الزمكان التالية. الرسم البياني (a) مرسوم من وجهة نظرك؛ (b) من وجهة نظري. عندما تمر بي، تأتي سيارتك تشغل محركاتها، وتخرج نفثة من الدخان من عادمها؛ يسمى هذا الحدث Bb في المخططات. وبعد 2 ميكروثانية (جزء من مليون من الثانية)،

كما ترى أنت، تنفجر مفرقة نارية على المصد الأمامي لسيارتك؛ يُطلق على حدث التفجير هذا اسم D.



نظرًا لأن المكان والزمن نسيبان (مكانك أنت هو مزيج من مكاني أنا وزمني أنا)، فأنا وأنت تختلف حول الفاصل الزمني بين حدث انبعاث عادم المحرك B وحدث التفجير D. يفصل بينهما 2.0 ميكروثانية من زمك أنت، و 4.51 ميكروثانية من زمني أنا. وبالمثل، نحن نختلف حول الفاصل المكاني للأحداث؛ فهي 1.0 كيلومتر في مكانك أنت و 1.57 كيلومتر في مكاني أنا. وعلى الرغم من هذه الخلافات الزمنية والمكانية، فإننا نتفق على أن الحدثين يفصل بينهما خط مستقيم في الزمكان رباعي الأبعاد، ونتفق على أن «الفاصل المطلق» على طول هذا الخط (طول الخط الزمكاني) هو 0.8 كيلومتر. (وهذا مشابه لاتفاق الرجال والنساء المليدينيين على مسافة الخط المستقيم بين ملبينا وسيرونا).

يمكننا استخدام صيغة مينكوفسكي لحساب الفاصل الزمني المطلق: نقوم بضرب الفصل الزمني للأحداث في سرعة الضوء (299,792 كيلومترًا في الثانية)، ونحصل على الأرقام المقربة الموضحة في المخططات (0.600 كيلومتر بالنسبة إليك أنت، 1.35 كيلومتر بالنسبة إليّ أنا). ثم نقوم بتربيع الفواصل الزمنية والمكانية للأحداث، ونطرح الفواصل الزمنية المربعة من الفواصل المكانية، ونأخذ الجذر التربيعي. (وهذا مشابه لتربيع الفواصل بين الشرق والشمال، وإضافتها، وأخذ الجذر التربيعي). وكما هو موضح في الرسوم البيانية، على الرغم من أن فواصل الزمن والمكان تختلف عن فواصلنا، حصلنا على نفس الإجابة النهائية للفاصل المطلق: 0.8 كيلومتر.

هناك فرق واحد مهم فقط بين صيغة مينكوفسكي، التي نتبعها أنا وأنت، وصيغة فيثاغورس، التي يتبعها المليدينيون: يجب طرح فواصلنا المربعة بدلًا من إضافتها. يرتبط هذا الطرح ارتباطًا وثيقًا بالفرق المادي بين الزمكان، الذي نستكشفه أنا وأنت، و سطح الأرض، الذي يستكشفه المليدينيون - ولكن على الرغم من خطر إغضابك، سأتخلى عن شرح الارتباط، وأحيلك ببساطة إلى المناقشات في كتاب تايلور وويلر (1992).

كما سنرى في الصفحات القادمة، تنتج الجاذبية عن طريق انحناء (اعوجاج) للنسيج المطلق رباعي الأبعاد للزمكان، والثقوب السوداء والثقوب الدودية وموجات الجاذبية والمفردات كلها مبنية بالكامل فقط من هذا النسيج؛ أي أن كل واحدة منها عبارة عن نوع محدد من الاعوجاج الزمكاني.

نظرًا لأن النسيج المطلق للزمكان هو المسؤول عن مثل هذه الظواهر الرائعة،

فمن المحيط أننا لا نختبرها في حياتنا اليومية. ويكمن الخطأ في السرعة المنخفضة للتكنولوجيا التي نستخدمها (على سبيل المثال، السيارات الرياضية التي تسير بسرعة أبطأ بكثير من سرعة الضوء). بسبب سرعاتنا المنخفضة بالنسبة إلى بعضنا، فإننا نختبر المكان والزمن ككيانين منفصلين فقط، ولا نلاحظ أبدًا التناقضات بين الأطوال والأزمنة التي نقيسها أنا وأنت (لا نلاحظ أبدًا أن المكان والزمن نسيان)، ولن نلاحظ أبدًا أن مكاننا وأزمنتنا النسبية متحدة لتشكّل نسيج الزمكان المطلق رباعي الأبعاد.

ربما تتذكرون أن مينكوفسكي كان أستاذ الرياضيات الذي وصف أينشتاين بالكلب الكسول في أيام دراسته. في عام 1902، ترك مينكوفسكي -وهو روسي المولد- ETH في زيورخ ليتولى منصب أكثر جاذبية كأستاذ في جوتنجن بألمانيا. (كان العلم عالميًا في ذلك الوقت كما هو الآن). وفي جوتنجن، درس مينكوفسكي مقال أينشتاين عن النسبية الخاصة، وقد أعجب به. قادته هذه الدراسة إلى اكتشافه عام 1908 للطبيعة المطلقة للزمكان رباعي الأبعاد.

وعندما علم أينشتاين باكتشاف مينكوفسكي، لم يتأثر. أعاد مينكوفسكي كتابة قوانين النسبية الخاصة بلغة جديدة لها طبيعة رياضية أكثر من ذي قبل. وبالنسبة إلى أينشتاين، فقد حجبت الرياضيات الأفكار الفيزيائية التي تكمن وراء القوانين. وبينما استمر مينكوفسكي في تمجيد جمال وجهة نظره حول الزمكان، بدأ أينشتاين في إلقاء النكات حول علماء الرياضيات في جوتنجن الذين يصفون النسبية بلغة معقدة، لدرجة أن الفيزيائيين لن يتمكنوا من فهمها.

النكته، في الواقع، كانت على أينشتاين. وبعد أربع سنوات، في عام 1912، أدرك أن الزمكان المطلق لمينكوفسكي هو مبدأ أساسي لدمج الجاذبية في النسبية الخاصة. للأسف، لم يعيش مينكوفسكي ليرى ذلك؛ توفي بسبب التهاب الزائدة الدودية عام 1909 عن عمر ناهز الخامسة والأربعين.

سأعود إلى الزمكان المطلق عند مينكوفسكي لاحقًا في هذا الفصل. ومع ذلك، يجب عليّ أولاً تطوير خيط آخر من قصتي: قانون نيوتن للجاذبية وخطوات أينشتاين الأولى نحو التوفيق بينه وبين النسبية الخاصة، الخطوات التي اتخذها قبل أن يبدأ في تقدير إنجاز مينكوفسكي.

قانون نيوتن للجاذبية،

وخطوات أينشتاين الأولى لتزويجها بالنسبية

لقد تصور نيوتن الجاذبية على أنها قوة تعمل بين كل زوج من الأجسام في الكون، وهي قوة تسحب الأجسام بعضها تجاه بعض. كلما كانت كتل الأجسام أكبر وكلما اقتربت بعضها من بعض، كانت القوة أقوى. وبعبارة أكثر دقة، فإن القوة تتناسب طردياً مع حاصل ضرب كتلتي الأجسام، وتتناسب عكسياً مع مربع المسافة بينهما.

كان قانون الجاذبية هذا بمثابة انتصار فكري هائل. وعند دمج مع قوانين نيوتن للحركة، فقد أوضح مدارات الكواكب حول الشمس، والأقمار حول الكواكب، وقوى المد والجزر في المحيطات، وسقوط الصخور؛ وقد علّم نيوتن ورفاقه في القرن السابع عشر كيفية وزن الشمس والأرض¹.

خلال القرنين اللذين فصلا بين نيوتن وأينشتاين، تحسنت قياسات علماء الفلك للمدارات السماوية عدة مرات، مما وضع قانون نيوتن للجاذبية في اختبارات صرامة. وفي بعض الأحيان، كانت القياسات الفلكية الجديدة تتعارض مع قانون نيوتن، ولكن مع مرور الوقت تبين أن الملاحظات الرصدية أو تفسيراتها خاطئة. ومرة تلو الأخرى، انتصر قانون نيوتن على الخطأ التجريبي أو الفكري. على سبيل المثال، عندما بدا أن حركة كوكب أورانوس (الذي اكتُشف في عام 1781) تنتهك تنبؤات قانون نيوتن للجاذبية، بدا من المحتمل أن جاذبية كوكب آخر غير مكتشف لا بد أنها تسحب أورانوس، مما يؤدي إلى اضطراب مداره. تنبأت الحسابات التي أجراها لوفيريه، والتي اعتمدت فقط على قوانين نيوتن للجاذبية والحركة وعلى الملاحظات الرصدية لأورانوس، بالمكان الذي يجب أن يكون عليه هذا الكوكب الجديد في السماء. في عام 1846، عندما وجّه جالي تلسكوبه على الموقع، كان الكوكب المتوقع هناك خافتاً جداً بحيث لا يمكن رؤيته بالعين المجردة ولكنه مشرق بدرجة كافية لتلسكوبه. هذا الكوكب الجديد، الذي أثبت وجوده قانون نيوتن للجاذبية، أطلق عليه اسم «نبتون».

في أوائل القرن العشرين، بقي هناك تناقضان صغيران للغاية، ولكن محيران لقانون نيوتن للجاذبية. الأول، وهو وجود غرابة في مدار كوكب عطارد، قد يؤدي في النهاية

إلى فشل قانون نيوتن. أما الآخر، وهو وجود غرابة في مدار القمر، قد تؤدي إلى اختفائه في النهاية؛ سيتبين أنه تفسير خاطئ لقياسات علماء الفلك. وكما هي الحال في كثير من الأحيان مع القياسات الدقيقة، فإن من الصعب تحديد أي من التناقضين -أو كليهما- يجب أن يثير القلق.

لقد شك أينشتاين بشكل صحيح في أن غرابة عطارد (الانزياح الشاذ في الحضيض الشمسي؛ الإطار 2.2) هي الحقيقية، في حين أن غرابة القمر لم تكن كذلك. غرابة عطارد لها «رائحة» حقيقية؛ ولم يكن الأمر كذلك بالنسبة إلى القمر. ومع ذلك، فإن هذا الخلاف المشتبه به في التجربة مع قانون نيوتن للجاذبية كان أقل أهمية بكثير لأينشتاين من اقتناعه بأن قانون نيوتن ينتهك مبدأ النسبية الذي صاغه حديثاً (المبدأ الفوقي الذي ينص على أن جميع قوانين الفيزياء يجب أن تكون هي نفسها في كل إطار مرجعي قصوري). وبما أن أينشتاين يؤمن بشدة بمبدأ النسبية، فإن مثل هذا الانتهاك يعني أن قانون نيوتن للجاذبية معيب².

2.2 الإطار

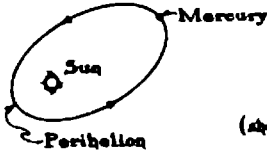
انزياح الحضيض الشمسي لعطارد

وصف كيبلر مدار عطارد بأنه قطع ناقص تحتل الشمس إحدى بؤرتيه (الشكل الأيسر، حيث تظهر المبالغة في استطالة القطع الناقص للمدار). ومع ذلك، بحلول أواخر القرن التاسع عشر، استنتج علماء الفلك من ملاحظاتهم الرصدية أن مدار عطارد ليس قطعاً ناقصاً تماماً. بعد كل رحلة حول مداره، يفشل عطارد بنسبة ضئيلة في العودة إلى نفس النقطة التي بدأ منها. يمكن وصف هذا الفشل بأنه انزياح مع كل مدار في تموضع أقرب نقطة لعطارد إلى الشمس (انزياح في الحضيض الشمسي). قاس علماء الفلك الحضيض الشمسي بمقدار 1.38 ثانية من القوس خلال كل مدار (الشكل الأيمن، حيث يكون الانزياح مبالغاً فيه).

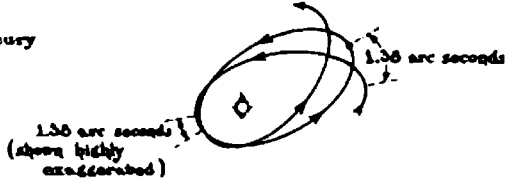
يمكن لقانون نيوتن للجاذبية أن يفسر 1.28 ثانية قوسية من هذا الانزياح البالغ 1.38 ثانية قوسية: الذي أنتجته قوى جاذبية المشتري والكواكب الأخرى على عطارد. ومع ذلك، ظل هناك تناقض قدره 0.10 ثانية قوسية: انزياح شاذ قدره 0.10 ثانية قوسية في

الحضيض الشمسي لعطارد خلال كل مدار. ادعى علماء الفلك أن الأخطاء والشكوك في قياساتهم كان مقدارهما فقط 0.01 قوس ثانية، ولكن مع الأخذ في الاعتبار الزوايا الصغيرة المقيسة (0.01 قوس من الثانية يعادل الزاوية التي تميل إليها شعرة الإنسان على مسافة 2 كيلومتر)، فليس من المستغرب أن يتشكك العديد من الفيزيائيين في أواخر القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين، وتوقعوا أن تنتصر قوانين نيوتن في النهاية.

MERCURY'S ORBIT
ACCORDING TO KEPLER



MERCURY'S ACTUAL ORBIT



كان منطق أينشتاين بسيطاً: وفقاً لنيوتن، تعتمد قوة الجاذبية على المسافة بين الجسمين الجاذبين (على سبيل المثال، الشمس وعطارد)، ولكن وفقاً للنظرية النسبية، تختلف تلك المسافة في الأطر المرجعية المختلفة. على سبيل المثال، تتنبأ قوانين النسبية لأينشتاين بأن المسافة بين الشمس وعطارد ستختلف بنحو جزء من المليار، اعتماداً على ما إذا كان الراصد يركب على سطح عطارد عند قياسه أو يركب على سطح الشمس. إذا كان كيلا الإطارين المرجعيين، عطارد والشمس، متساويين في الجودة في نظر قوانين الفيزياء، فما الإطار الذي ينبغي استخدامه لقياس المسافة التي تظهر في قانون نيوتن للجاذبية؟ وأي من الاختيارين، إطار عطارد أو إطار الشمس، من شأنه أن ينتهك مبدأ النسبية؟ أقنع هذا المأزق أينشتاين بأن قانون نيوتن للجاذبية لا بد أن يكون معيباً.

جراً أينشتاين مذهلة. بعد أن تجاهل المكان المطلق والزمن المطلق لنيوتن من دون أي مبرر تجريبي تقريباً، أصبح الآن يميل إلى تجاهل قانون نيوتن الناجح للغاية في الجاذبية، وتبرير تجريبي أقل. ومع ذلك، لم يكن مدفوعاً بالتجربة، بل ببصيرته العميقة والحدسية حول الكيفية التي يجب أن تنصرف بها قوانين الفيزياء.

بدأ أينشتاين بحثه عن قانون جديد للجاذبية في عام 1907. وكانت خطواته الأولية مدفوعة بمشروع كتابة: على الرغم من أن مكتب براءات الاختراع صنفه الآن على أنه

مجرد «خبير تقني من الدرجة الثانية» (رُفِّي مؤخرًا من الدرجة الثالثة)، فإنه أصبح يحظى باحترام كبار الفيزيائيين في العالم بما يكفي لدعوته لكتابة مقال مراجع للتشرة السنوية للنشاط الإشعاعي والإلكترونيات Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik حول قوانينه النسبية الخاصة للفيزياء وتبعاتها. وفي أثناء عمله على مراجعته، اكتشف أينشتاين استراتيجية قيمة للبحث العلمي: إن ضرورة طرح موضوع ما بطريقة تعليمية قائمة بذاتها و متماسكة تجبر المرء على التفكير فيه بطرق جديدة. يندفع المرء إلى فحص كل ثغرات و عيوب الموضوع والبحث عن علاج لها.

الجاذبية هي أكبر فجوة في موضوعه، لأن النسبية الخاصة بأطرها القصورية التي لا يمكن لأي قوة جاذبية أن تؤثر عليها، كانت متجاهلة تمامًا للجاذبية. لذلك، بينما أينشتاين يكتب، ظل يبحث عن طرق لدمج الجاذبية في قوانينه النسبية. كما يحدث لمعظم الناس المنغمسين في اللغز، حتى عندما لم يفكر أينشتاين بشكل مباشر في هذه المشكلة، فإن الجزء الخلفي من عقله يفكر فيها. وهكذا حدث أنه في أحد أيام نوفمبر 1907، وبكلمات أينشتاين نفسه: «كنت جالسًا على كرسي في مكتب براءات الاختراع في برن، عندما خطرت في ذهني فجأة فكرة: إذا سقط شخص ما سقوطًا حرًا، فلن يشعر بوزنه».

الآن، من الممكن أن يكون لدينا هذا الفكر، أنت أو أنا، ولن يؤدي إلى أي استنتاج. لكن أينشتاين قصة مختلفة. لقد سعى إلى عصر الأفكار حتى نهايتها؛ لقد انتزع منها كل ذرة من البصيرة قدر استطاعته. وهذه هي الفكرة الأساسية؛ لقد أشار إلى رؤية ثورية جديدة للجاذبية. ووصفها فيما بعد بأنها: «أسعد فكرة في حياتي».

وسرعان ما تداعت عواقب هذا الفكر، وخلدت في مراجعة مقال أينشتاين. إذا سقطت سقوطًا حرًا (على سبيل المثال، عن طريق القفز من أعلى منحدر)، فلن تشعر فقط بوزنك، بل سيبدو لك، من جميع النواحي، كما لو أن الجاذبية قد اختفت تمامًا من محيطك. على سبيل المثال، إذا أسقطت بعض الصخور من يدك في أثناء سقوطك، فسوف تسقط أنت والصخور معًا جنبًا إلى جنب. إذا نظرت إلى الصخور وتجاهلت محيطك الآخر، فلن تتمكن من تمييز ما إذا كنت أنت والصخور تسقطان معًا نحو الأرض إلى الأسفل أو تطفوان بحرية في الفضاء، بعيدًا عن كل الأجسام التي تتمتع بالجاذبية. في الواقع، أدرك أينشتاين أن في جوارك المباشر لا علاقة للجاذبية بالموضوع، ومن المستحيل اكتشافها، وأن كل قوانين الفيزياء يجب أن تكون هي نفسها في إطار مرجعي صغير - (مختبر)

تحمله معك عندما تسقط - إذا كنت تتحرك بحرية عبر الكون من دون جاذبية. بمعنى آخر، إطارك المرجعي الصغير الذي يسقط سقوطاً حراً «يعادل» إطاراً مرجعياً قصورياً في عالم خالٍ من الجاذبية، وقوانين الفيزياء التي تختبرها هي نفسها تلك الموجودة في إطار قصوري خالٍ من الجاذبية؛ أي أنها ستؤول إلى قوانين النسبية الخاصة. (ستتعلم لاحقاً لماذا يجب أن يبقى الإطار المرجعي صغيراً، وأن كلمة «صغير» تعني صغيراً جداً مقارنة بحجم الأرض - أو، بشكل عام، صغيراً جداً مقارنة بالمسافة التي تتغير خلالها قوة الجاذبية واتجاهها).

كمثال على التكافؤ بين إطار القصور الذاتي الخالي من الجاذبية وإطارك الصغير الذي يسقط سقوطاً حراً، فكر في قانون النسبية الخاصة الذي يصف حركة جسم متحرك بحرية (فليكن قذيفة مدفع) في عالم من دون جاذبية. إذا قستها في أي إطار قصوري في ذلك الكون المثالي، يجب أن تتحرك الكرة على طول خط مستقيم وبسرعة موحدة. قارن هذا بحركة الكرة في كوننا الحقيقي الذي يتمتع بالجاذبية: إذا أطلقت الكرة من مدفع على مرج عشبي على الأرض وشاهدها كلب يجلس على العشب، فإن الكرة تنقوس لأعلى ولأعلى ثم تسقط للخلف، إلى الأرض (الشكل 2.2). إنه يتحرك على طول القطع المكافئ (منحنى أسود متصل) إذا أمكن قياسه عبر الإطار المرجعي للكلب. يطلب أينشتاين أن تشاهد نفس هذه القذيفة من إطار مرجعي صغير يسقط بحرية. يكون هذا أسهل إذا كان المرج على حافة منحدر. ومن ثم يمكنك القفز من أعلى الجرف بمجرد إطلاق المدفع، ومشاهدة الكرة في أثناء سقوطها.

وللمساعدة في تصوير ما تراه في أثناء سقوطك، تخيل أنك تحمل أمانك نافذة بها اثنا عشر لوحاً زجاجياً، وتشاهد الكرة من خلال نافذتك (الجزء الأوسط من الشكل 2.2). في أثناء سقوطك، ترى تسلسل المشاهد في اتجاه عقارب الساعة الموضح في الشكل 2.2. عند النظر إلى هذا التسلسل، تجاهل الكلب، والمدفع، والشجرة، والجرف؛ ركّز فقط على زجاج النوافذ والكرة. كما ترى، بالنسبة إلى زجاج النوافذ، تتحرك الكرة على طول الخط المستقيم المتقطع بسرعة ثابتة.

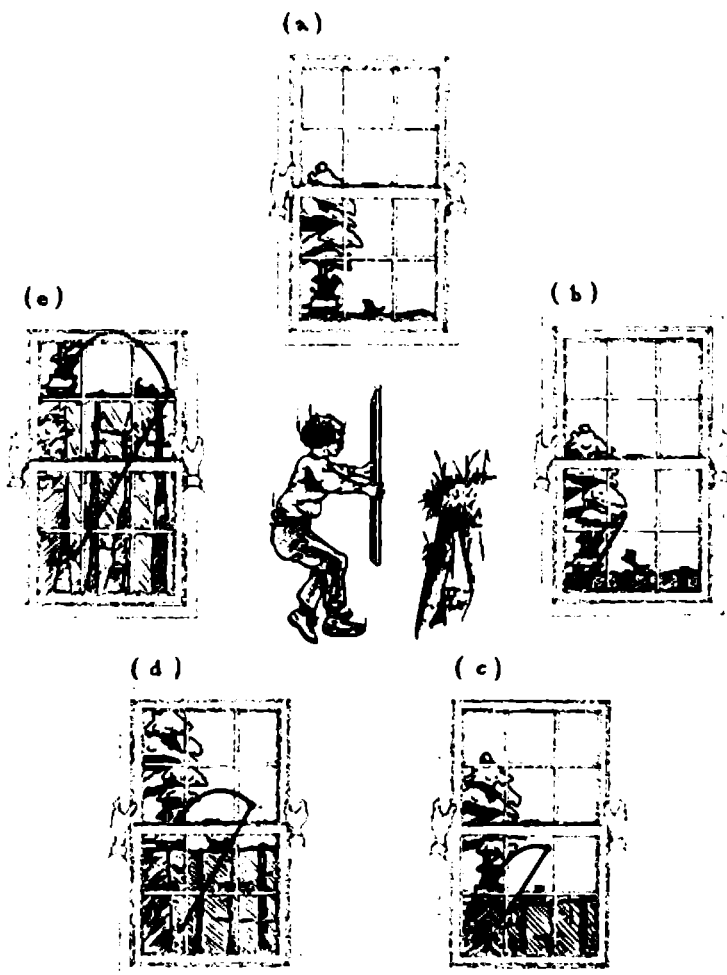
وهكذا، في الإطار المرجعي للكلب، تخضع الكرة لقوانين نيوتن؛ يتحرك على طول القطع المكافئ. في إطارك المرجعي الصغير الذي يسقط بحرية، فإنه يطيع قوانين النسبية الخاصة الخالية من الجاذبية؛ يتحرك على طول خط مستقيم بسرعة ثابتة. وما هو صحيح

في هذا المثال لا بد أن يكون صحيحًا بشكل عام، كما أدرك أينشتاين في قفزة كبيرة من البصيرة:

في أي إطار مرجعي صغير يسقط بحرية في أي مكان في عالمنا الذي يتمتع بالجاذبية، يجب أن تكون قوانين الفيزياء هي نفسها كما في إطار مرجعي قصوري في كون مثالي خالٍ من الجاذبية. أطلق أينشتاين على هذا مبدأ التكافؤ، لأنه يؤكد أن الإطارات الصغيرة التي تسقط بحرية في وجود الجاذبية تعادل الإطارات القصورية في غياب الجاذبية.

أدرك أينشتاين أن هذا التأكيد كان له نتيجة مهمة للغاية: فهو يعني أنه إذا أعطينا اسم «الإطار المرجعي القصوري» لكل إطار مرجعي صغير يسقط بحرية في كوننا الحقيقي الذي يتمتع بالجاذبية (على سبيل المثال، المختبر الصغير كالإطار المرجعي الذي تحمله في أثناء سقوطك من فوق الجرف)، فإن كل ما نقوله النسبية الخاصة عن إطارات القصورية في الكون المثالي من دون جاذبية سيكون تلقائيًا صحيحًا أيضًا في كوننا الحقيقي. والأهم من ذلك، أن مبدأ النسبية يجب أن يكون صحيحًا: جميع الأطر المرجعية الصغيرة القصورية (التي تسقط سقوطًا حرًا) في كوننا الحقيقي الذي يتمتع بالجاذبية يجب أن تكون «متساوية»؛ ولا يمكن تفضيل أي شيء على أي شيء آخر في نظر قوانين الفيزياء. أو بتعبير أدق (انظر الفصل الأول):

قم بصياغة أي قانون فيزيائي من حيث القياسات التي أجريت في إطار مرجعي قصوري صغير الحجم (الذي يسقط سقوطًا حرًا). بعد ذلك، عند إعادة صياغته من حيث القياسات في أي إطار قصوري صغير آخر (الذي يسقط سقوطًا حرًا)، يجب أن يتخذ قانون الفيزياء نفس الشكل الرياضي والمنطقي تمامًا كما في الإطار الأصلي. ويجب أن يكون هذا صحيحًا سواء كان الإطار القصوري (الذي يسقط سقوطًا حرًا) موجودًا في الفضاء بين المجرات الخالي من الجاذبية، أو يسقط من منحدر على الأرض، أو يقع في مركز مجرتنا، أو يسقط عبر أفق ثقب أسود.



2.2 المنتصف: تقفز من أعلى جرف ممسكاً بنافاذة مكونة من اثني عشر لوحاً أمامك. بقية الشكل، في اتجاه عقارب الساعة من الأعلى: ما تراه من خلال النافذة عند إطلاق مدفع. بالنسبة إلى إطار النافذة المتساقطة، فإن مسار الكرة هو الخط المستقيم المتقطع؛ أما بالنسبة إلى الكلب و سطح الأرض، فهو القطع المكافئ الصلب.

مع هذا التوسع لمبدأ النسبية ليشمل الجاذبية، اتخذ أينشتاين خطواته الأولى نحو مجموعة جديدة من قوانين الجاذبية -خطوته الأولى من النسبية الخاصة إلى النسبية العامة.

كن صبوراً عزيزي القارئ. ربما يكون هذا الفصل هو الأصعب في الكتاب. ستصبح قصتي أبسط وأبعد عن الأمور العلمية في الفصل التالي، عندما نبدأ في استكشاف الثقوب السوداء.

بعد أيام قليلة من صياغة مبدأ التكافؤ، استخدمه أينشتاين ليقدم تنبؤاً مذهلاً، يسمى تمدد الزمن بفعل الجاذبية: إذا كان شخص ما في حالة سكون بالنسبة إلى جسم ذي جاذبية، فكلما أصبح الشخص أقرب إلى الجسم، أصبح مرور الزمن أبطأ. على سبيل المثال، في غرفة على الأرض، يجب أن يتدفق الزمن بالقرب من الأرض بشكل أبطأ منه بالقرب من السقف. ومع ذلك، تبين أن هذا الاختلاف الأرضي ضئيل جداً (3 أجزاء فقط في 1016؛ أي 300 جزء من مليار المليار)، بحيث يصعب اكتشافه. على النقيض من ذلك (كما سنرى في الفصل التالي)، يكون تمدد الزمن الناتج عن الجاذبية هائلاً بالقرب من الثقب الأسود: إذا كان وزن الثقب 10 أضعاف وزن الشمس، فإن الزمن سيتدفق فوق سطح أفق الثقب بستيمتر واحد بشكل أبطأ بمقدار 6 ملايين مرة عن المناطق البعيدة تماماً عن الثقب؛ وعند الأفق بالضبط، سيتوقف تدفق الزمن تماماً. (تخيل إمكانية السفر عبر الزمن: إذا نزلت إلى ما فوق أفق الثقب الأسود مباشرة، وحلقت هناك لمدة عام واحد من التدفق الزمني القريب من الأفق، ثم عدت إلى الأرض، فستجد أنه خلال تلك السنة الواحدة من زمناك، قد مرت ملايين السنوات على الأرض!).

اكتشف أينشتاين تمدد الزمن بفعل الجاذبية من خلال حجة معقدة إلى حد ما، لكنه قدم لاحقاً عرضاً بسيطاً وأنيقاً لها، يوضح بشكل جميل أساليبه في التفكير الفيزيائي. قدم هذا العرض التوضيحي في الإطار 2.4، وشرح الانزياح الضوئي لدوبلر، والذي يعتمد عليه، في الإطار 2.3.

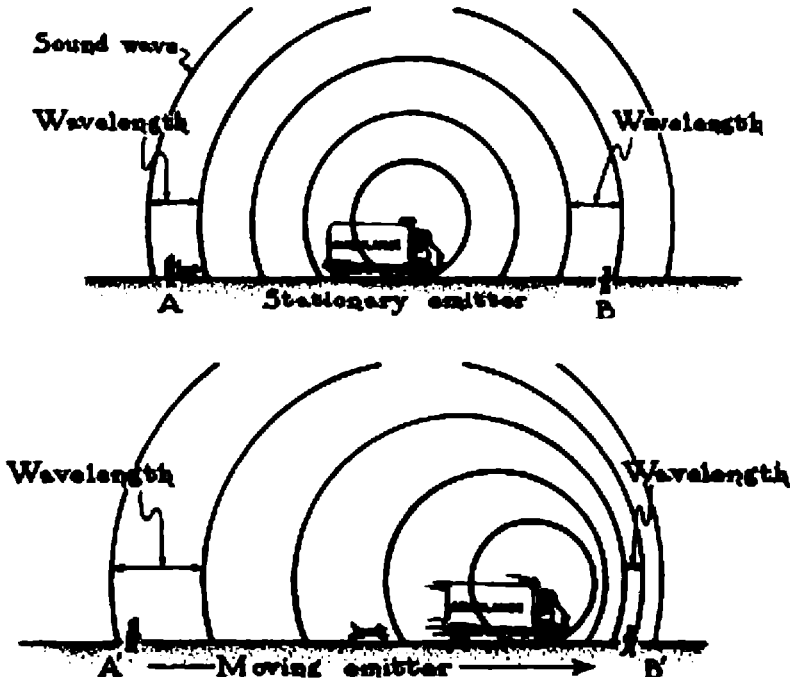
عندما بدأ أينشتاين في كتابة مقاله المراجع عام 1907، توقع أن يصف النسبية في كون من دون جاذبية. ومع ذلك، في أثناء كتابته، اكتشف ثلاثة أدلة على لغز كيفية تشابك الجاذبية مع قوانينه للنسبية الخاصة - مبدأ التكافؤ، وتمدد الزمن بفعل الجاذبية، وتوسيع مبدأ النسبية الخاص به ليشمل الجاذبية - لذلك دمج هذه القرائن في مقاله. ثم، في بداية شهر ديسمبر تقريباً، أرسل المقال بالبريد إلى محرر للنشرة السنوية للنشاط الإشعاعي والإلكترونات ووجه انتباهه بالكامل إلى التحدي المتمثل في ابتكار وصف نسبي كامل للجاذبية.

الإطار 2.3

انزياح دوبلر

عندما يتحرك باعث ومستقبل للموجات أحدهما تجاه الآخر، يرى المستقبل الموجات تنزاح إلى تردد أعلى - أي فترة زمنية أقصر وطول موجي أقصر. إذا كان الباعث والمستقبل يتحرك أحدهما بعيدًا عن الآخر، فإن المستقبل يرى الموجات تتحول إلى تردد أقل، أي فترة زمنية أطول وطول موجي أطول. وهذا ما يسمى انزياح دوبلر، وهي خاصية لجميع أنواع الموجات: الموجات الصوتية، والموجات في الماء، والموجات الكهرومغناطيسية، وهلم جرا.

بالنسبة إلى الموجات الصوتية، يعد انزياح دوبلر ظاهرة يومية مألوفة. يمكنك سماعه من خلال الانخفاض المفاجئ في حدة الصوت عندما تمر سيارة إسعاف بسرعة مع إطلاق صفارات الإنذار (الرسم b)، أو عندما تمر طائرة تهبط في سماء المنطقة. يمكن للمرء أن يفهم انزياح دوبلر من خلال التفكير في الرسم التوضيحي أدناه.



وما ينطبق على الموجات ينطبق أيضًا على النبضات. إذا أرسل الباعث نبضات ضوئية متباعدة بانتظام (أو أي شيء آخر)، فإن المستقبل، في أثناء تحرك الباعث نحوه، سيواجه النبضات بتردد أعلى (زمن أقصر بين النبضات) من التردد الذي بثه الباعث.

2.4 الاطار

تمدد الزمن بفعل الجاذبية

خذ ساعتين متطابقتين. ضع واحدة على أرضية الغرفة بجوار حفرة ستسقط فيها لاحقًا، ثم اربط الأخرى بسقف الغرفة بواسطة خيط. تنظم دقات ساعة الأرضية من خلال تدفق الزمن بالقرب من الأرض، وتنظم دقات ساعة السقف من خلال تدفق الزمن بالقرب من السقف.



(a)

(b)

دع ساعة السقف تبث نبضة قصيرة جدًا من الضوء مع كل دقة، وقم بتوجيه النبضات نحو الأسفل باتجاه الساعة الأرضية. مباشرة قبل أن تبث ساعة السقف نبضتها الأولى، قم بقطع الخيط الذي يحملها، حتى تسقط سقوطًا حرًا. إذا كان الزمن بين الدقات قصيرًا جدًا، ففي اللحظة التالية لدقتها وإصدار نبضتها الثانية، ستكون الساعة قد سقطت بشكل

غير محسوس وستظل تقريباً في حالة سكون بالنسبة إلى السقف (الشكل a). وهذا بدوره يعني أن الساعة لا تزال تشعر بنفس تدفق الزمن الذي يشعر به السقف نفسه؛ أي أن الفاصل الزمني بين انبعاثات النبضات يحكمه التدفق الزمني للسقف.

مباشرة قبل أن تصل نبضة الضوء الأولى إلى الأرض، قم بإسقاط الساعة الأرضية في الفتحة (الشكل b). تصل النبضة الثانية بعد ذلك بوقت قصير جداً بحيث تتحرك ساعة الأرضية المتساقطة بحرية بشكل غير محسوس بين النبضات، ولا تزال تقريباً في حالة سكون بالنسبة إلى الأرضية، وبالتالي لا تزال تشعر بنفس تدفق الزمن الذي تشعر به الأرضية نفسها.

بهذه الطريقة، حوّل أينشتاين مشكلة مقارنة تدفق الزمن كما يشعر بها السقف والأرض إلى مشكلة مقارنة معدلات دقات ساعتين تسقطان سقوطاً حرّاً: ساعة السقف المتساقطة التي تشعر بزمن السقف، وساعة الأرضية المتساقطة التي تشعر بزمن الأرضية. ثم سمح له مبدأ التكافؤ الخاص بأينشتاين بمقارنة دقات الساعتين اللتين تسقطان سقوطاً حرّاً بمساعدة قوانينه النسبية الخاصة.

نظراً لأن ساعة السقف سقطت قبل ساعة الأرضية، فإن سرعة هبوطها تكون دائماً أكبر من سرعة ساعة الأرضية (الشكل b)؛ أي أنها تتحرك نحو ساعة الأرضية. وهذا يعني أن ساعة الأرضية ستشهد نبضات ضوئية لساعة السقف بانزياح دوبلر (الإطار 2.3)؛ أي أنها ستراها تصل في مسافة زمنية أقرب من الزمن بين الدقات الخاصة بهما. نظراً لأن الزمن بين النبضات ينظمه التدفق الزمني للسقف، والزمن بين دقات ساعة الأرضية ينظمه التدفق الزمني للأرضية، فهذا يعني أن الزمن يجب أن يتدفق بشكل أبطأ بالقرب من الأرض منه بالقرب من السقف؛ وبعبارة أخرى، يجب على الجاذبية أن تمدد تدفق الزمن.

في 24 ديسمبر، كتب إليّ صديق يقول: «في هذا الوقت أنا مشغول باعتبارات حول النظرية النسبية فيما يتعلق بقانون الجاذبية... آمل أن أوضح التغييرات العامة غير المبررة حتى الآن لانزياح الحضيض الشمسي لعطارد... ولكن حتى الآن لا يبدو أن الأمر ناجح». بحلول أوائل عام 1908، شعر أينشتاين بالإحباط بسبب عدم تحقيق أي تقدم حقيقي، واستسلم، ووجّه انتباهه إلى عالم الذرات والجزيئات والإشعاع («العالم الضئيل»)، حيث

بدت المشكلات التي لم تحل في الوقت الحالي أكثر سهولة وإثارة للاهتمام³.

خلال عام 1908 (بينما يؤخذ مينكوفسكي المكان والزمن، يستهزئ أينشتاين بهذا التوحيد)، وخلال أعوام 1909 و1910 و1911، بقي أينشتاين مع العالم الضئيل. وشهدت هذه السنوات أيضًا انتقاله من مكتب براءات الاختراع في برن إلى منصب أستاذ مساعد في جامعة زيورخ، ثم إلى منصب أستاذ في براغ -مركز الحياة الثقافية للإمبراطورية النمساوية المجرية.

لم تكن حياة أينشتاين كأستاذٍ سهلة. لقد وجد أنه من المزعج أن يضطر إلى إلقاء محاضرات منتظمة حول موضوعات ليست قريبة من بحثه. لم يستطع أن يستجمع الطاقة لإعداد مثل هذه المحاضرات جيدًا، ولا الحماس لجعلها متألقة، مع أنه كان يتألق عندما يلقي محاضرات في موضوعات عزيزة على قلبه. لقد أصبح أينشتاين الآن عضوًا كامل العضوية في الدائرة الأكاديمية في أوروبا، لكنه كان يدفع الثمن. وعلى الرغم من هذا الثمن، فإن أبحاثه في مجال العالم الضئيل تقدمت للأمام بشكل مثير للإعجاب، وأنتجت رؤى أكسبته لاحقًا جائزة نوبل (انظر الإطار 4.1).

ثم، في منتصف عام 1911، تضاعف افتتان أينشتاين بالأشياء الضئيلة وأعاد انتباهه إلى الجاذبية، التي ظل يكافح معها طوال الوقت تقريبًا حتى وقت صياغته المظفرة للنسبية العامة في نوفمبر 1915.

التركيز الأولي لصراع أينشتاين مع الجاذبية هو قوى المد والجزر بفعل الجاذبية.

قوى المد والجزر بفعل الجاذبية وانحناء الزمكان

تخيل نفسك رائد فضاء في الفضاء، أعلى بكثير من خط استواء الأرض، وتسقط بحرية نحوه. على الرغم من أنك لن تشعر بوزنك في أثناء سقوطك، فإنك في الواقع ستشعر ببعض التأثيرات الصغيرة المتبقية للجاذبية. تسمى هذه البقايا «المد والجزر بفعل الجاذبية»، ويمكن فهمها من خلال التفكير في قوى الجاذبية التي تشعر بها، أولًا من وجهة نظر شخص يراقبك من الأرض بالأسفل، ثم من وجهة نظرك الخاصة.



2.3 في أثناء سقوطك باتجاه الأرض، تمتدك قوى المد والجزر بفعل الجاذبية من الرأس إلى القدم وتضغط عليك من الجانبين.

كما يُرى من الأرض (الشكل 2.3 a)، فإن قوة الجاذبية تختلف قليلاً في التأثير على أجزاء مختلفة من جسدك. نظرًا لأن قدميك أقرب إلى الأرض من رأسك، فإن الجاذبية تسحبهما بقوة أكبر من رأسك، لذا فهي تمدك من القدم إلى الرأس. ولأن الجاذبية تسحب دائمًا نحو مركز الأرض، وهو اتجاه يميل قليلاً ناحية اليسار على جانبك الأيمن ويميل قليلاً ناحية اليمين على جانبك الأيسر، فإن السحب يكون إلى اليسار قليلاً على يمينك وإلى اليمين قليلاً على يسارك؛ أي أنه يضغط جانبيك إلى الداخل.

من وجهة نظرك (الشكل 3.2 b)، فإن قوة الجاذبية الكبيرة المتجهة نحو الأسفل قد اختلفت. تشعر بانعدام الوزن. ومع ذلك، فإن قطعة الجاذبية المختلفة هي فقط القطعة التي سحبتك إلى الأسفل. يبقى التمدد من الرأس إلى القدم والضغط من جانب إلى آخر. وهو ناجم عن الاختلافات بين تأثير الجاذبية على الأجزاء الخارجية من جسمك وتأثير الجاذبية على مركز جسمك، وهي اختلافات لا يمكنك التخلص منها بالسقوط الحر.

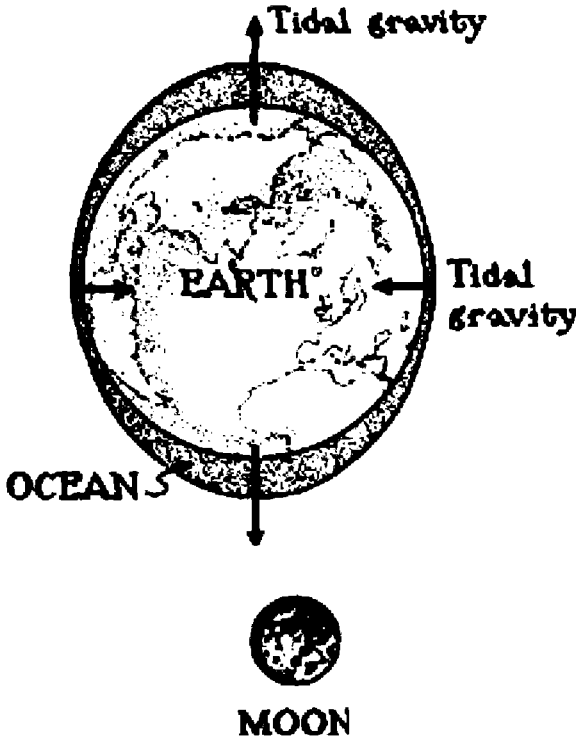
يُطلق على التمدد الرأسي والضغط الجانبي الذي تشعر به في أثناء السقوط اسم المد والجزر بفعل الجاذبية أو قوى المد والجزر بفعل الجاذبية، لأنه عندما يكون القمر مصدرها بدلاً من الأرض وعندما تشعر بها الأرض بدلاً منك، فإنهما ينتجان المد والجزر على المحيطات. انظر الإطار 5.2.

في استنتاجه لمبدأ التكافؤ، تجاهل أينشتاين قوى المد والجزر بفعل الجاذبية؛ تظاهر بعدم وجودها. (تذكر جوهر حجته: عندما تسقط بحرية، فإنك «لن تشعر بوزنك» و«سيبدو لك، من جميع النواحي، كما لو أن الجاذبية قد اختلفت من حواليك»). برر أينشتاين تجاهل قوى المد والجزر. من خلال تخيل أنك (وإطارك المرجعي) صغير جدًا. على سبيل المثال، إذا كان حجمك بحجم نملة أو أصغر، فستكون جميع أجزاء جسمك قريبة جدًا بعضها من بعض، وبالتالي، فإن اتجاه وقوة سحب الجاذبية سيكونان تقريبًا متساويين على الأجزاء الخارجية من جسمك كما هي الحال بالنسبة إلى مركزه، والفرق في الجاذبية بين أجزائك الخارجية ومركزك، والذي يسبب التمدد والانضغاط بفعل المد والجزر، سيكون صغيرًا للغاية. من ناحية أخرى، إذا كنت عملاقًا طوله 5000 كيلومتر، فإن اتجاه وقوة جاذبية الأرض سيختلفان بشكل كبير بين الأجزاء الخارجية لجسمك ومركزه؛ وبالمقابل، في أثناء سقوطك، ستشعر بتمدّد وانضغاط بفعل المد والجزر بشكل هائل.

هذا المنطق أقنع أينشتاين أنه في إطار مرجعي صغير بما فيه الكفاية، يسقط سقوطاً حراً (إطار صغير جداً مقارنة بالمسافة التي تتغير فيها قوة الجاذبية)، لا ينبغي للمرء أن يكون قادراً على اكتشاف أي تأثيرات للمد والجزر بفعل الجاذبية على الإطلاق؛ أي أن الإطارات المرجعية الصغيرة التي تسقط سقوطاً حراً في كوننا الذي يتمتع بالجاذبية تعادل الإطارات القصورية في كون من دون جاذبية. ولكن ليس كذلك بالنسبة إلى الإطارات الكبيرة. وفي عام 1911، بدا لأينشتاين أن قوى المد والجزر المحسوسة في الإطارات الكبيرة هي مفتاح الطبيعة النهائية للجاذبية.

2.5 الإطارات

المد والجزر في المحيطات اللذان تنتجهما قوى المد والجزر



على جانب الأرض الأقرب للقمر، تكون الجاذبية القمرية أقوى منها في مركز الأرض، لذا فهي تسحب المحيطات نحو القمر بقوة أكبر من سحبها للأرض الصلبة، ونتيجة

لذلك تتمدد المحيطات إلى الخارج قليلاً نحو القمر. على الجانب الأبعد من القمر، تكون جاذبية القمر أضعف، لذا فهي تسحب المحيطات نحو القمر بقوة أقل من سحبها للأرض الصلبة، ونتيجة لذلك، تتمدد المحيطات بعيداً عن القمر. على الجانب الأيسر من الأرض، قوة جاذبية القمر، التي تشير نحو مركز القمر، لها مكون يمين طفيف، وعلى الجانب الأيمن لها مكون يسار طفيف؛ وهذه المكونات تضغط المحيطات نحو الداخل. هذا النمط من التمدد والانضغاط المحيطي ينتج مَدَّين مرتفعين وجزرين منخفضين كل يوم، في أثناء دوران الأرض.

إذا لم تتصرف حركة المد والجزر على شاطئ المحيط المفضل لديك بهذه الطريقة بالضبط، فهذا ليس خطأ جاذبية القمر، بل يرجع إلى أثرين: (1) وجود تأخر في استجابة الماء للمد والجزر بفعل الجاذبية. يستغرق الأمر وقتاً حتى تتحرك المياه داخل وخارج الخلجان والموانئ وقنوات الأنهار والمضايق ومسافات البدء الأخرى في الساحل. (2) تبلغ قوة تمدد وضغط جاذبية الشمس على الأرض نصف قوة جاذبية القمر تقريباً، ولكنها موجهة بشكل مختلف لأن موقع الشمس في السماء يختلف (عادة) عن موقع القمر. إن المد والجزر على الأرض هما نتيجة للمد والجزر بفعل الجاذبية المشتركة للشمس والقمر.

من الواضح كيف يفسر قانون نيوتن للجاذبية قوى المد والجزر: فهي تنتج عن اختلاف في قوة واتجاه سحب الجاذبية، من مكان إلى آخر. لكن قانون نيوتن، بقوة الجاذبية التي تعتمد على المسافة، لا بد أن يكون خاطئاً؛ لقد انتهك مبدأ النسبية «في إطار من توجد المسافة التي يجب قياسها؟». أصبح التحدي الذي واجهه أينشتاين حينها هو صياغة قانون جاذبية جديد تماماً يتوافق في نفس الوقت مع مبدأ النسبية، ويشرح المد والجزر بفعل الجاذبية بطريقة جديدة وبسيطة ومقنعة.

من منتصف عام 1911 إلى منتصف 1912، حاول أينشتاين شرح قوى المد والجزر بفعل الجاذبية باستخدام فرضية اعوجاج الزمن، في حين أن المكان مسطح ومنبسط. هذه الفكرة التي بدت ثورية هي امتداد لفكرة تمدد الزمن تحت تأثير الجاذبية: اختلاف معدل تدفق الزمن بين المنطقة قرب السقف من جهة ومنطقة أرضية الغرفة من جهة أخرى، إنها فكرة تبدو قائمة على اعوجاج الزمن. ربما توقع أينشتاين نمطاً أكثر تعقيداً من اعوجاج

الزمن سوف ينتج كل تأثيرات الجاذبية، بدءًا من المد وجزر بفعل الجاذبية إلى مدارات الكواكب التي تأخذ شكل القطع الناقص، وحتى شذوذ/ غرابة إزاحة الحضيض الشمسي لكوكب عطارد.

بعد اثني عشر شهرًا من تعقب هذه الفكرة الفاتنة، هجرها أينشتاين، وذلك لسبب وجيه. الزمن نسبي. إن زمنك (أنت) هو مزج من زمني (أنا) ومن مكاني (أنا) (إذا تحرك (أنا) و(أنت) أحدهما باتجاه الآخر)، ولذا لو حدث اعوجاج في زمنك (أنت) ولكن مكانك (أنت) منبسط/ مسطح، فلا بد أن زمني ومكاني أنا في حالة اعوجاج، وكذلك بالنسبة إلى كل شخص آخر. أنت وفقط أنت الذي سيكون لديه مكان منبسط مسطح، وهكذا فإن قوانين الفيزياء ستعامل مع إطارك المرجعي باعتباره مختلفًا بشكل أساسي عن جميع الأطر المرجعية الأخرى - وهذا يعد انتهاكًا لمبدأ النسبية.

يبدو أن اعوجاج الزمن كان ذا «رائحة صحيحة» بالنسبة إلى أينشتاين، لذا -ربما- استنتج اعوجاج الزمن لكل شيء، وامتدادًا لذلك فقد أبدع فكرة اعوجاج المكان لكل شيء كذلك. ربما كان لهذا الخليط من الاعوجاج للزمن والمكان القدرة على تفسير المد والجزر بفعل الجاذبية.

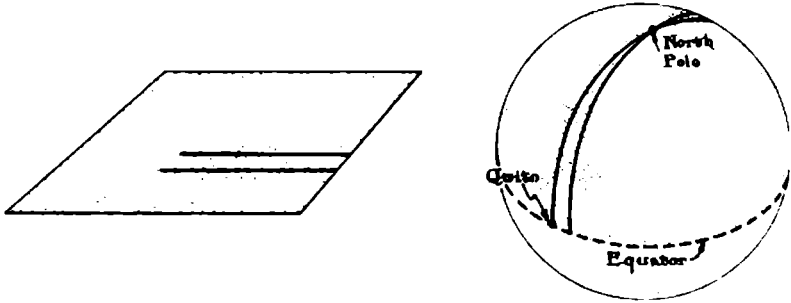
كانت فكرة اعوجاج كل من الزمن والمكان مخيفة إلى حد ما، حيث إن الكون يقبل عددًا لا نهائيًا من الأطر المرجعية المختلفة، كل منها يتحرك بسرعة مختلفة، فلا بد أن ثمة عددًا لا نهائيًا من الأزمنة المعوجة والأمكنة (جمع مكان) المعوجة! آمن أينشتاين -لحسن الحظ- بأن هيرمان مينكوفسكي قدم أداة قوية لتبسيط مثل هذا التعقيد: «من الآن فصاعدًا، سيكون المكان بنفسه، والزمن بنفسه، محكومًا عليهما بالفناء، وفقط الاتحاد بين الاثنين هو الذي سيحفظ الواقع مستقلًا». أصبح لدينا الآن؛ زمكان واحد ومتفرد ومطلق رباعي الأبعاد في كوننا؛ واعوجاج زمن كل شيء واعوجاج المكان لكل شيء سيغير عنهما من خلال اعوجاج زمكان مينكوفسكي المطلق والفريد والمتفرد.

كان هذا الاستنتاج هو الذي قدمه أينشتاين في صيف 1912 (باستثناء أنه فضّل استخدام كلمة «انحناء» عن كلمة «اعوجاج»). بعد أربع سنوات من إطلاق النكات على فكرة الزمكان المطلق لمينكوفسكي، اضطر أينشتاين في النهاية إلى اعتناقها، ثم عوجها (ليّها).

ما الذي يعنيه انحناء الزمكان (أو اعوجاجه)؟ للتوضيح، سيكون من الأخرى أن نسأل: ما الذي يعنيه ثني أو (اعوجاج) سطح ثنائي الأبعاد؟ يوضح الشكل 2.4 سطحًا منبسطًا وسطحًا منحنيًا. على السطح المنبسط (صفحة ورقية عادية) رسم لخطين مستقيمين مطلقين. يسير الخطان أحدهما بجانب الآخر على التوازي. لقد افترض عالم الرياضيات الإغريقي (إقليدس) - وهو الذي ابتكر موضوع الرياضيات الذي نعرفه الآن بالهندسة الإقليدية - أن من متطلبات الخطين المتوازيين ألا يتقاطعا أبدًا. إن عدم التقاطع هذا يعد اختبارًا لا جدال فيه على (انبساط) السطح الذي رسمت عليه هذه الخطوط. وبالتالي، فإنه داخل المكان المسطح (المستوي)، لا تتقاطع الخطوط المتوازية بشكل مبدئي. وبالتالي، إذا وجدنا أن هناك تقاطعًا بين خطين كانا متوازيين في البداية، فسوف نستنتج أن هذا المكان ليس مسطحًا (أو مستويًا).

السطح المنحني في الشكل 2.4 هو الكرة الأرضية. تقع على تلك الكرة الأرضية مدينة كيتو بالإكوادور؛ فهي تقع على خط الاستواء. أرسل خطًا مستقيمًا تمامًا من كيتو، متجهًا نحو الشمال. سينتقل الخط شمالًا، عند خط طول ثابت، عبر القطب الشمالي.

بأي معنى هذا خط مستقيم؟ بمعنىين. أحدهما هو المعنى الحاسم للغاية بالنسبة إلى شركات الطيران: إنها دائرة عظيمة، والدوائر الكبرى على الكرة الأرضية هي أقصر الطرق بين نقطتين، وبالتالي، فهي أنواع المسارات التي ترغب شركات الطيران في الطيران عبرها. إنشاء أي خط آخر يربط كيتو بالقطب الشمالي سيكون بالضرورة أطول من الدائرة الكبرى.



2.4 إن خطين متوازيين في البداية لن يتقاطعا أبدًا على سطح منبسط مثل صفحة من ورق كالموضحة على اليسار، أما الخطان المتوازيان في البداية، فسوف يتقاطعان على سطح منحني مثل الكرة الأرضية للعالم والموضحة على اليمين.

المعنى الثاني للاستقامة هو الذي سنستخدمه أدناه، عند مناقشة الزمكان: في المناطق الصغيرة بما فيه الكفاية على الكرة الأرضية على طول مسار الدائرة الكبرى، يصعب ملاحظة انحناء الكرة الأرضية. في مثل هذه المنطقة، تبدو الدائرة الكبرى مستقيمة بالمعنى المعتاد للاستقامة على الورقة المسطحة، وهو الشعور بالاستقامة الذي يستخدمه المساحون المحترفون، الذين يحددون حدود الممتلكات باستخدام أشعة الليزر أو ما على شاكلتها. بهذا المعنى لدى المساحين، فإن الدائرة الكبرى تصبح مستقيمة في كل منطقة صغيرة على امتداد مسارها.

يستخدم علماء الرياضيات الاسم جيوديسي لأي خط، على سطح منحني أو ملتوي، يكون مستقيماً في هذين المعنيين: بمعنى «أقصر مسار» لشركات الطيران، وبالنسبة إلى المساحين.

تحرك الآن شرقاً على الكرة الأرضية من كيتو ببضعة ستيمترات، وقم ببناء خط مستقيم جديد (الدائرة الكبرى؛ الجيوديسي) يكون موازياً تماماً، عند خط الاستواء، للخط الذي يمر عبر كيتو. وهذا الخط المستقيم، مثل الخط الأول، سيمر عبر القطب الشمالي للكرة الأرضية. إن انحناء سطح الكرة الأرضية هو الذي يجبر الخطين المستقيمين، المتوازيين في البداية، على التقاطع عند القطب الشمالي.

ومع هذا الفهم لتأثيرات الانحناء في الأسطح ثنائية الأبعاد، يمكننا العودة إلى الزمكان رباعي الأبعاد والسؤال عن الانحناء هناك.

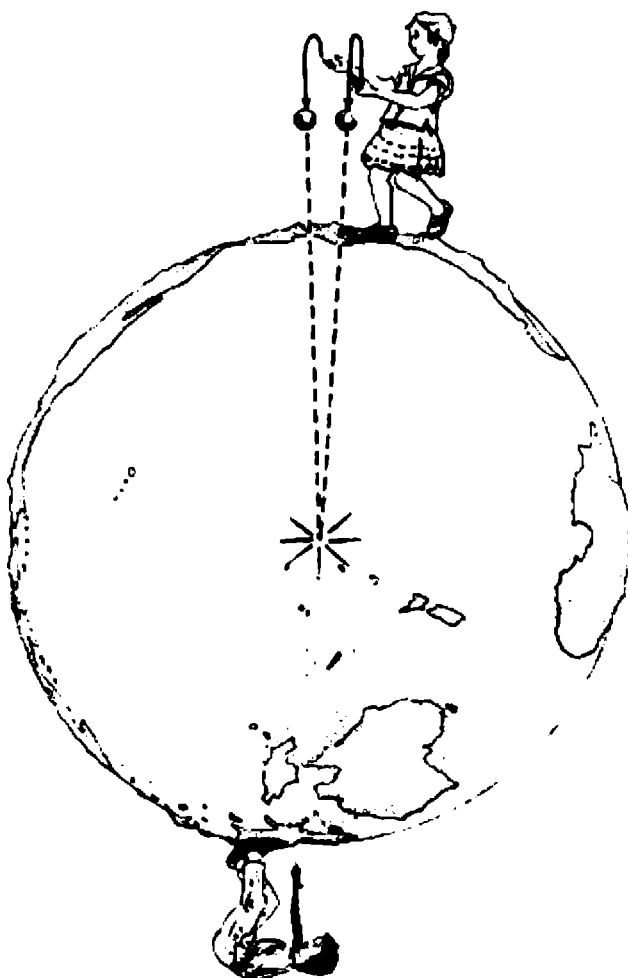
في الكون المثالي من دون جاذبية، لا يوجد اعوجاج للمكان، ولا اعوجاج في الزمن؛ الزمكان ليس فيه انحناء. في مثل هذا الكون، وفقاً لقوانين النسبية الخاصة لأينشتاين، يجب على الجسيمات المتحركة بحرية أن تتحرك على طول خطوط مستقيمة تماماً. يجب أن تحافظ على اتجاه ثابت وسرعة ثابتة، كما أمكن قياسها في أي إطار مرجعي قصوري. وهذا مبدأ أساسي في النسبية الخاصة.

الآن، يضمن مبدأ التكافؤ لأينشتاين أن الجاذبية لا يمكنها تغيير هذا المبدأ الأساسي للحركة الحرة: عندما يدخل جسيم متحرك بحرية، في كوننا الحقيقي الذي يتمتع بالجاذبية، ويمر عبر إطار مرجعي قصوري صغير بالقصور الذاتي (يسقط سقوطاً حراً)، لا بد أن يتحرك الجسيم على طول خط مستقيم عبر هذا الإطار.

ومع ذلك، فإن الحركة في خط مستقيم عبر إطار قصوري صغير هي المقاربة الواضحة لسلوك الخط المستقيم بالشكل الذي يقيسه المساحون في منطقة صغيرة من سطح الأرض؛ وكما أن سلوك الخط المستقيم في مناطق صغيرة على الأرض يعني أن الخط هو في الواقع جيوديسية لسطح الأرض، كذلك فإن حركة الجسم في خط مستقيم في مناطق صغيرة من الزمكان تعني أن الجسم يتحرك على طول جيوديسية الزمكان. وما ينطبق على هذا الجسم يجب أن ينطبق على جميع الجسيمات: كل جسيم يتحرك بحرية (كل جسيم لا تؤثر عليه أي قوى، باستثناء الجاذبية) ينتقل على امتداد جيوديسية الزمكان.

وبمجرد أن أدرك أينشتاين ذلك، أصبح واضحاً له أن المد والجزر بفعل الجاذبية هما مظهر من مظاهر انحناء الزمكان.

لفهم السبب، تخيل التجربة الفكرية التالية (إنها تجربتي وليست تجربة أينشتاين). قف على سطح جليدي في القطب الشمالي، وأمسك بكرتين صغيرتين، واحدة في كل يد (الشكل 2.5). ارمِ الكرتين في الهواء بحيث تكونان متجاورتين، وبحيث ترتفعان للأعلى على طول مسارين متوازيين بدقة، ثم شاهدهما وهما تسقطان مرة أخرى إلى الأرض. الآن، في تجربة فكرية كهذه، يمكنك أن تفعل أي شيء تريده ما دام لم ينتهك قوانين الفيزياء. إنك ترغب في مشاهدة مساري الكرتين في أثناء سقوطهما تحت تأثير الجاذبية، ليس فقط فوق سطح الأرض، ولكن أيضاً تحتها. ولهذا الغرض، يمكنك التظاهر بأن الكرتين مصنوعتان من مادة يمكنها أن تخترق تربة الأرض وصخورها من دون أن تتباطأ على الإطلاق (الثقوب السوداء الصغيرة تمتلك هذه الخاصية)، ويمكنك التظاهر بأنك وصيدق على الطرف الآخر من جانب الأرض، والذي يشاهد التجربة أيضاً، بل يمكنه متابعة حركة الكرتين داخل الأرض باستخدام «الرؤية بالأشعة السينية».



2.5 كرتان تسقطان في الهواء في مسارين متوازيين بدقة، لو كان بمقدورهما العبور عبر الأرض من دون عائق، فسوف تصطدمان قرب مركز الكرة الأرضية.

عندما تسقط الكرتان على الأرض، فإن المد والجزر بفعل جاذبية الأرض يضغطان عليهما معاً بنفس الطريقة التي يضغطان بها على جانبيك إذا كنت رائد فضاء في وضع السقوط (الشكل 2.3). إن قوة المد والجزر بفعل الجاذبية مناسبة تمامًا لجعل الكرتين تسقطان بدقة تقريباً نحو مركز الأرض، وتصطدم إحداهما بالأخرى هناك.

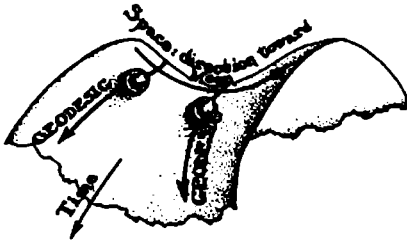
والآن تأتي نتيجة هذه التجربة الفكرية: تحركت كل كرة على طول خط مستقيم محدد (خط جيوديسي) عبر الزمكان. في البداية، كان الخطان المستقيمان متوازيين. في وقت لاحق عبرتا (اصطدمتا الكرتان). يشير هذا التقاطع للخطوط المستقيمة المتوازية في البداية إلى انحناء الزمكان. ومن وجهة نظر أينشتاين، فإن انحناء الزمكان يسبب التقاطع؛ أي أنه يسبب اصطدام الكرات، تمامًا كما يتسبب انحناء الكرة الأرضية في تقاطع الخطوط المستقيمة في الشكل 2.4. ومن وجهة نظر نيوتن، فإن المد والجزر بفعل الجاذبية هما اللذان يسيبان التقاطع.

وهكذا، فإن أينشتاين ونيوتن، مع وجهتي نظرهما المختلفتين جدًا حول طبيعة المكان والزمن، يطلقان أسماء مختلفة تمامًا على العامل الذي يسبب التقاطع. يسميه أينشتاين انحناء الزمكان؛ ويسميه نيوتن المد والجزر بفعل الجاذبية. ولكن هناك زبوناً واحدًا فقط هو الذي يتسبب في هذا الشيء. ولذلك، فإن انحناء الزمكان والمد والجزر بفعل الجاذبية يجب أن يكونا نفس الشيء تمامًا، لكن التعبير عنهما له لغات مختلفة.

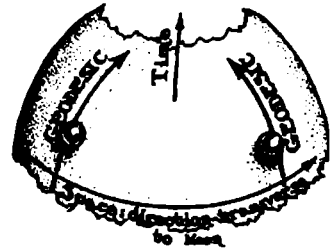
تواجه عقولنا البشرية صعوبة كبيرة في تصور الأسطح المنحنية في أكثر من بُعدين؛ ولذلك، يكاد يكون من المستحيل تصور انحناء الزمكان رباعي الأبعاد. ومع ذلك، يمكن اكتساب بعض المعرفة من خلال النظر إلى أجزاء مختلفة ثنائية الأبعاد من الزمكان. يستخدم الشكل 2.6 قطعتين من هذا القبيل لشرح كيف يكون انحناء الزمكان التمدد والانضغاط لقوى المد والجزر والذي ينتج عنه المد والجزر في المحيط.

ويصور الشكل 2.6 a قطعة واحدة من الزمكان في محيط الأرض، وهي قطعة تتضمن الزمن بالإضافة إلى المكان على طول الاتجاه نحو القمر. يحني القمر هذه المنطقة من الزمكان، ويمتد الانحناء إلى قسمين جيوديسيين، بالطريقة الموضحة. في المقابل، نرى نحن البشر جسيمين يتحركان بحرية، فينتقلان على امتداد الجيوديسي، ويتمددان بعيدًا في أثناء انتقالهما، ونحن نفسر هذا التمدد على أنه قوة المد والجزر بفعل الجاذبية. لا تؤثر قوة المد والجزر (انحناء الزمكان) على الجسيمات المتحركة بحرية فحسب، بل تؤثر أيضًا على محيطات الأرض؛ فهي تمدد المحيطات بالطريقة الموضحة في المربع 2.5، مما ينتج عنه انتفاخات محيطية على جانبي الأرض الأقرب والأبعد عن القمر. يحاول الانتفاخان الانتقال على طول جيوديسية الزمكان المنحني (الشكل 2.6 a)، وبالتالي يحاول أحدهما التحليق بعيدًا عن الآخر، لكن جاذبية الأرض (انحناء الزمكان الذي تنتجه

الأرض، ولا يظهر في الشكل) تتعارض مع هذا التحليق، وبالتالي فإن المحيط ينتفخ فقط. الشكل 2.6 b هو قطعة مختلفة من الزمكان بالقرب من الأرض، قطعة تتضمن الزمن، بالإضافة إلى المكان على طول اتجاه عرضي لاتجاه القمر. يحني القمر هذه المنطقة من الزمكان، ويضغط الانحناء على الجيوديسيات معًا بالطريقة الموضحة. في المقابل، نرى نحن البشر الجسيمات المتحركة بحرية والتي تنتقل على طول الجيوديسي بشكل عرضي في اتجاه القمر، تنضغط معًا بواسطة الانحناء (بواسطة المد والجزر بفعل جاذبية القمر)، وبالمثل نرى محيطات الأرض تنضغط على طول اتجاهات عرضية باتجاه القمر. وينتج عن ضغط المد والجزر هذا الضغط المحيطي العرضي الموضح في الإطار 2.5.



(a)



(b)

2.6 قطعتان في بُعدين من الزمكان المنحني، بالقرب من الأرض. يسبب القمر الانحناء. ويخلق الانحناء امتداد مد وجزر على طول الاتجاه الطولي نحو القمر (a)، وانضغاط المد والجزر على طول الاتجاه العرضي للقمر (b)، وهذا التمدد والانضغاط ينتجان مد المحيط وجزره بالطريقة التي ناقشناها في الإطار 2.5 أعلاه.

كان أينشتاين أستاذًا في براغ في صيف عام 1912، عندما أدرك أن المد والجزر بفعل الجاذبية وانحناء الزمكان هما نفس الشيء. لقد كان إعلانًا رائعًا - رغم أنه لم يكن متأكدًا منه بعد، ولم يفهمه بعد بشكل كامل (بالشكل الذي وصفته هنا في هذا الكتاب)، ولم يقدم تفسيرًا كاملاً للجاذبية. لقد أخبرت أينشتاين أن انحناء الزمكان هو السبب في حركة الجسيمات الحرة وهو المسؤول عن رفع المد والجزر في المحيط، لكنها لم تخبره كيف يحدث الانحناء. يعتقد أينشتاين أن المادة الموجودة داخل الشمس والأرض والكواكب الأخرى هي المسؤولة بطريقة أو بأخرى عن الانحناء. ولكن كيف؟ كيف تسبب المادة

هذا الاعوجاج للزمكان، وما تفاصيل هذا الاعوجاج؟ أصبح البحث عن قانون الاعوجاج هو الشغل الشاغل لأينشتاين.

بعد أسابيع قليلة من «اكتشاف» انحناء الزمكان، انتقل أينشتاين من براغ عائداً إلى زيورخ، ليتولى منصب الأستاذية في جامعته ETH. لدى وصوله إلى زيورخ في أغسطس 1912، طلب أينشتاين النصيحة من زميل دراسة قديم، مارسيل جروسمان، الذي أصبح الآن أستاذاً للرياضيات هناك. شرح أينشتاين فكرته بأن المد والجزر بفعل الجاذبية هما انحناء الزمكان، ثم تساءل عما إذا كان أي عالم رياضيات قد طور مجموعة من المعادلات الرياضية التي يمكن أن تساعد في اكتشاف قانون الاعوجاج؛ أي القانون الذي يصف كيف تجبر المادة الزمكان على الانحناء. لم يكن جروسمان -الذي كان تخصصه جوانب أخرى من الهندسة- متأكداً، ولكن بعد تصفح المكتبة عاد بإجابة: نعم، المعادلات الضرورية موجودة بالفعل. لقد اخترعها إلى حد كبير عالم الرياضيات الألماني بيرنهارد ريمان في ستينيات القرن التاسع عشر، والإيطالي جريجوريو ريتشي في ثمانينيات القرن التاسع عشر، وبمساعدة طالب عند ريتشي هو توليو ليفي سيفيتا في تسعينيات القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين؛ وقد أطلق عليها اسم «حساب التفاضل المطلق» (أو، بلغة الفيزيائيين في الفترة من 1915 إلى 1960، «تحليل الشادات tensor analysis»)، أو بلغة عام 1960 حتى الوقت الحاضر، «الهندسة التفاضلية»). لكن جروسمان أخبر أينشتاين أن هذه الهندسة التفاضلية عبارة عن فوضى رهيبية لا ينبغي للفيزيائيين أن يشاركوا فيها. هل كانت هناك أي أشكال هندسية أخرى يمكن استخدامها لمعرفة قانون الاعوجاج؟ لا.

وهكذا، وبمساعدة كبيرة من جروسمان، شرع أينشتاين في إتقان تعقيدات الهندسة التفاضلية. كما درّس جروسمان الرياضيات لأينشتاين، درّس أينشتاين شيئاً من الفيزياء لجروسمان. ونقل أينشتاين لاحقاً عن جروسمان قوله: «أعترف أنني اكتسبت شيئاً مهماً من دراسة الفيزياء. من قبل، عندما كنت أجلس على كرسي وأشعر بأثر من الحرارة خلفه «الجلس السابق للكرسي»، كنت أرتعد قليلاً. لقد انتهى هذا الأمر تماماً، ففي هذه المرحلة علمتني الفيزياء أن الحرارة شيء غير شخصي تماماً».

لم يكن تعلم الهندسة التفاضلية مهمة سهلة لأينشتاين. كانت روح الموضوع غريبة عن

الحجج الفيزيائية البديهية التي وجدها طبيعية جدًا. في أواخر أكتوبر 1912، كتب إلى أرنولد سومرفيلد، وهو عالم فيزياء ألماني بارز: «أنا الآن منشغل حصريًا بمشكلة الجاذبية وأعتقد أنه بمساعدة عالم رياضيات (جروسمان) وهو صديق لي، سأتمكن من حلها. أنا الآن أنطلق إلى السيطرة على جميع الصعوبات. ولكن هناك شيئًا واحدًا مؤكدًا، وهو أنني لم أكافح بهذه القوة طوال حياتي، وأنني أشعر باحترام كبير للرياضيات التي كنت أعتبر الأجزاء الدقيقة منها، بعقلية بسيطة، ترفًا خالصًا حتى الآن! ومقارنة بهذه المشكلة، فإن النظرية النسبية الأصلية [النسبية الخاصة] هي مجرد لعبة أطفال».

لقد ناضل أينشتاين وجروسمان معًا خلال فصلي الخريف والشتاء لحل لغز كيفية تجبر المادة على انحناء الزمكان. ولكن على الرغم من جهودهما الشاملة، لم يكن من الممكن جعل الرياضيات متوافقة مع رؤية أينشتاين. لقد استعصى عليهما قانون الاعوجاج.

كان أينشتاين مقتنعًا بأن قانون الاعوجاج يجب أن يخضع لنسخة معممة (موسعة) من مبدئه للنسبية الخاصة: يجب أن يبدو متماثلًا في كل إطار مرجعي، وليس فقط الإطارات القصورية (السقوط سقوطًا حرًا)، ولكن أيضًا الإطارات غير القصورية. لا ينبغي لقانون الاعوجاج أن يعتمد في صياغته على أي إطار مرجعي خاص أو أي فئة خاصة من الأطر المرجعية على الإطلاق⁴. وللأسف، يبدو أن معادلات الهندسة التفاضلية لا تقبل مثل هذا القانون. أخيرًا، في أواخر الشتاء، توقف أينشتاين وجروسمان عن البحث ونشروا أفضل قانون يمكن أن يجدها لقانون الاعوجاج، وهو قانون اعتمد في تعريفه على فئة خاصة من الأطر المرجعية.

لقد تمكن أينشتاين، المتفائل إلى الأبد، من إقناع نفسه، لفترة وجيزة، بأن هذه ليست كارثة. كتب إلى صديقه الفيزيائي بول إهرنفيست في أوائل عام 1913: «ما الذي يمكن أن يكون أجمل من أن هذا التخصص الضروري يتبع [المعادلات الرياضية للحفظ على الطاقة وكمية الحركة]؟»، ولكن بعد مزيد من التفكير اعتبرها كارثة. كتب إلى لورنتز في أغسطس 1913: «إن إيماني بمصادقية النظرية [«قانون الاعوجاج»] لا يزال متقلبًا... [بسبب الفشل في الانصياع لمبدأ النسبية المعمم]، إن النظرية تناقض نقطة البداية الخاصة بها وكل شيء ضاع في الهواء».

وبينما أينشتاين وجروسمان يكافحان مع انحناء الزمكان، واجه فيزيائيون آخرون

منتشرين في أنحاء القارة الأوروبية التحدي المتمثل في توحيد قوانين الجاذبية مع النسبية الخاصة. لكن لا أحد منهم -جونار نوردستروم في هلسنكي بفنلندا؛ جوستاف مي في جرايفسفالد، ألمانيا؛ ماكس أبراهام في ميلانو، إيطاليا- تبني وجهة نظر أينشتاين حول انحناء الزمكان. وبدلاً من ذلك، تعاملوا مع الجاذبية، مثل الكهرومغناطيسية، باعتبارها ناتجة عن مجال القوى الذي يعيش في زمكان النسبية الخاصة المسطح الخاص بمينكوفسكي. ولا عجب أنهم اتبعوا هذا النهج: فالرياضيات التي استخدمها أينشتاين وجروسمان كانت معقدة بشكل رهيب، وقد أنتجت قانون الاعوجاج الذي ينتهك مبادئ مؤلفيه.

دار الجدل بين أصحاب وجهات النظر المختلفة. كتب أبراهام: «إن شخصاً، مثل هذا المؤلف، كان عليه أن يحذر مراراً وتكراراً نغمة [مبدأ النسبية]، إنه سوف يرحب بارتياح بحقيقة أن صاحبها نفسه قد اقتنع الآن بعدم إمكانية الدفاع عنها». وكتب أينشتاين ردّاً على ذلك: «في رأيي أن الوضع لا يشير إلى فشل مبدأ النسبية... وليس هناك أدنى سبب للشك في صحتها». وقد وصف سرّاً نظرية أبراهام عن الجاذبية بأنها «حصان فخم يفتقر إلى ثلاث أرجل». قال أينشتاين لأصدقائه في عامي 1913 و1914 عن هذا الجدل: «أنا أستمتع بهذه القضية، لقد تناولونا كأننا لحم ذبيحة. أنا أستمتع بالخلافات. سأعزف له لحناً». «أنا أستمتع بأن ينشغل الزملاء عمومًا بالنظرية [التي طورتها أنا وجروسمان]، على الرغم من أن هدفهم في الوقت الحالي هو قتلها... في ظاهر الأمر، نظرية نوردستروم... أكثر قبولاً بكثير. لكنها أيضاً مبنية على [الزمكان المينكوفسكي المسطح]، وهو الاعتقاد الذي أشعر أنه بمثابة خرافة».

في أبريل 1914، ترك أينشتاين ETH للحصول على درجة الأستاذية في برلين، ولم يكن له أي واجبات تدريسية. أخيراً، أصبح بإمكانه العمل في الأبحاث بقدر ما يشاء، وحتى القيام بذلك في المنطقة المحفزة المجاورة لعلماء الفيزياء العظماء في برلين، ماكس بلانك ووالتر نيرنست. في برلين، على الرغم من اندلاع الحرب العالمية الأولى في يونيو 1914، واصل أينشتاين سعيه للحصول على وصف مقبول لكيفية تسبب المادة في انحناء الزمكان، وهو وصف لم يعتمد على أي فئة خاصة من الأطر المرجعية -قانون محسن للاعوجاج.

بعد رحلة بالقطار مدتها ثلاث ساعات من برلين، في قرية جوتنجن الجامعية حيث

عمل مينكوفسكي، هناك أحد أعظم علماء الرياضيات في كل العصور: ديفيد هيلبرت. خلال عامي 1914 و 1915، أبدى هيلبرت اهتمامًا عاطفيًا بالفيزياء. لقد أبهرته أفكار أينشتاين المنشورة، لذلك دعا أينشتاين في أواخر يونيو من عام 1915 لزيارة المكان. بقي أينشتاين لمدة أسبوع تقريبًا وألقى ست محاضرات، مدة كل منها ساعتان لهيلبرت وزملائه. بعد عدة أيام من الزيارة، كتب أينشتاين إلى صديق: «لقد شعرت بسعادة غامرة عندما رأيت في جوتنجن أن كل شيء [في عملي] مفهوم حتى أدق التفاصيل. أنا مبتهج مع هيلبرت».

بعد عدة أشهر من عودته إلى برلين، أصبح أينشتاين أكثر حزنًا من أي وقت مضى بسبب قانون أينشتاين-جروسمان للاعوجاج. لم ينتهك هذا رؤيته القائلة بأن قوانين الجاذبية يجب أن تكون واحدة في جميع الأطر المرجعية فحسب، بل اكتشف أيضًا بعد حسابات شاقة أنها أعطت قيمة خاطئة للانزياح الشاذ في الحضيض الشمسي لمدار عطارد. وكان يأمل أن تفسر نظريته انزياح الحضيض الشمسي، وبالتالي حل تناقض الانزياح بشكل ينتصر على قوانين نيوتن. مثل هذا الإنجاز من شأنه أن يعطي على الأقل بعض التأكيد التجريبي على أن قوانين الجاذبية التي وضعها صحيحة وأن نيوتن كان مخطئًا. ومع ذلك، فإن حساباته، المستندة إلى قانون أينشتاين-جروسمان للاعوجاج، أعطت انزياحًا في الحضيض الشمسي يبلغ نصف المقدار الذي رُصد فقط.

ومن خلال مراجعة حساباته القديمة مع جروسمان، اكتشف أينشتاين بعض الأخطاء الحاسمة. لقد عمل بشكل محموم طوال شهر أكتوبر، وفي يوم 4 نوفمبر قدم في الجلسة العامة الأسبوعية للأكاديمية البروسية للعلوم في برلين، وصفًا لأخطائه وقانونًا منقحًا للاعوجاج - لا يزال يعتمد قليلًا على فئة خاصة من العلوم، الأطر المرجعية، ولكن أقل اعتمادًا من ذي قبل.

ظل أينشتاين غير راضٍ، وكافح طوال الأسبوع التالي مع قانون يوم 4 نوفمبر، ووجد أخطاء، وقدم اقتراحًا آخر لقانون الاعوجاج في اجتماع الأكاديمية في 11 نوفمبر. ولكن لا يزال القانون يعتمد على الأطر المرجعية الخاصة؛ يعني لا يزال ينتهك مبدأ النسبية.

وبعد أن استسلم لهذا الانتهاك، كافح أينشتاين خلال الأسبوع التالي لحساب عواقب قانونه الجديد الذي يمكن رصده بالتلسكوبات. لقد تنبأ بأن ضوء النجوم الذي يمر عبر

طرف الشمس يجب أن ينحرف بفعل الجاذبية بزاوية 1.7 ثانية قوسية (وهو توقع ستؤكده قياسات دقيقة في أثناء كسوف الشمس بعد أربع سنوات). والأهم لأينشتاين هو أن القانون الجديد قد حسب بدقة الانزياح الصحيح للحضيض الشمسي لعطارد! لقد طار فرحاً. لمدة ثلاثة أيام كان متحمساً جداً للدرجة أنه لم يتمكن من العمل. قدم هذا الانتصار في الاجتماع التالي للأكاديمية في 18 نوفمبر.

لكن انتهاك قانونه لمبدأ النسبية ما زال يزعجه. لذلك، خلال الأسبوع التالي، واصل أينشتاين حساباته ووجد خطأ آخر، وهو الخطأ الحاسم. وأخيراً كل شيء أصبح في مكانه الصحيح. أصبحت الشكلية الرياضية بأكملها الآن خالية من أي اعتماد على أطر مرجعية خاصة: إن لها نفس الشكل عند التعبير عنها في كل إطار مرجعي (انظر الإطار 2.6 أدناه)، وبالتالي أطاعت مبدأ النسبية. لقد أثبت أينشتاين رؤيته لعام 1914 بالكامل! ولا تزال الشكلية الجديدة تعطي نفس التنبؤات لانزياح الحضيض الشمسي لعطارد ولانحراف الضوء بفعل الجاذبية، وقد أدرج تنبؤه عام 1907 بتمدد زمن الجاذبية. هذه الاستنتاجات، والشكل النهائي الأخير لقانونه الرياضي للنسبية العامة لقانون الاعوجاج، قدمه أينشتاين إلى الأكاديمية البروسية في 25 نوفمبر.

وبعد ثلاثة أيام، كتب أينشتاين إلى صديقه أرنولد سومرفيلد: «خلال الشهر الماضي، مررت بواحدة من أكثر الأوقات إثارة وصعوبة في حياتي، ولكنها أيضاً واحدة من أكثر الأوقات نجاحاً». ثم، في رسالة أرسلها في شهر يناير إلى بول إهرنفيست: «تخيل فرحتي [إن قانون الاعوجاج الجديد الخاص بي يطبع مبدأ النسبية] ونتيجة لذلك [يتنبأ القانون] بانزياح الحضيض الشمسي الصحيح لعطارد. لقد علقت في النشوة لعدة أيام». وبعد ذلك، يتحدث عن نفس الفترة: «إن سنوات البحث في الظلام عن الحقيقة التي يشعر بها المرء ولا يستطيع التعبير عنها، والرغبة الشديدة وتناوب الثقة والشكوك حتى يصل المرء إلى الوضوح والفهم، لا يعرفها إلا من اختبرها بنفسه».

ومن اللافت للنظر أن أينشتاين لم يكن أول من اكتشف الشكل الصحيح لقانون الاعوجاج، وهو الشكل الذي يخضع لمبدأ النسبية الخاص به. الاعتراف بالاكتشاف الأول يجب أن يذهب إلى هيلبرت. في خريف عام 1915، بينما أينشتاين يناضل من أجل الوصول إلى القانون الصحيح، ويرتكب خطأ رياضياً تلو الآخر، فكر هيلبرت في الأشياء التي تعلمها من زيارة أينشتاين الصيفية إلى جوتنجن. وبينما هو في إجازة خريفية

في جزيرة روجن في بحر البلطيق، خطرت له الفكرة الرئيسية، وفي غضون أسابيع قليلة أصبح لديه القانون الصحيح -الذي لم يشتق من طريق التجربة والخطأ الشاق لأينشتاين، ولكن من خلال طريق رياضي أنيق وموجز. قدم هيلبرت اشتقاقه والقانون الناتج في اجتماع الأكاديمية الملكية للعلوم في جوتنجن في 20 نوفمبر 1915، قبل خمسة أيام فقط من تقديم أينشتاين للقانون نفسه في اجتماع الأكاديمية البروسية في برلين.

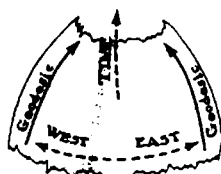
ومن الطبيعي تمامًا، ووفقًا لوجهة نظر هيلبرت الخاصة للأشياء، أن قانون الاعوجاج الناتج منح سريعًا اسم معادلة المجال لأينشتاين (الإطار 2.6) بدلًا من تسميته على اسم هيلبرت. كان هيلبرت قد نفذ الخطوات الرياضية القليلة الأخيرة لاكتشافه بشكل مستقل وفي وقت واحد تقريبًا مع أينشتاين، لكن أينشتاين كان مسؤولًا بشكل أساسي عن كل ما سبق تلك الخطوات: الاعتراف بأن المد والجزر بفعل الجاذبية يجب أن يكون هو نفس اعوجاج الزمكان، والرؤية التي يجب فيها أن يخضع قانون الاعوجاج لمبدأ النسبية، وأول 90٪ من هذا القانون، هي معادلة مجال أينشتاين. في الواقع، لولا أينشتاين، ربما لم يكن من الممكن اكتشاف قوانين النسبية العامة للجاذبية إلا بعد عدة عقود.

الإطار 2.6

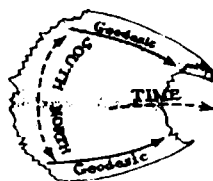
معادلة أينشتاين للمجال: قانون أينشتاين لاعوجاج الزمكان

ينص قانون أينشتاين لاعوجاج الزمكان، أو معادلة المجال لأينشتاين، على أن «الكتلة والضغط يسببان اعوجاجًا للزمكان». وبشكل أكثر تحديدًا:

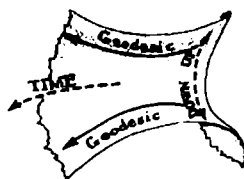
في أي تموضع في الزمكان، اختر إطارًا مرجعيًا عشوائيًا. في هذا الإطار المرجعي، استكشف انحناء الزمكان من خلال دراسة كيف أن الانحناء (أي المد والجزر بفعل الجاذبية) يدفع الجسيمات المتحركة بحرية معًا أو يسحبها بعيدًا على طول كل اتجاه من الاتجاهات الثلاثة لمكان الإطار المختار: الاتجاه شرق-غرب، الاتجاه شمال-جنوب، والاتجاه أعلى-أسفل. تتحرك الجسيمات على طول جيوديسية الزمكان (الشكل 6.2)، ويتناسب طرديًا معدل دفعها معًا أو انفصال بعضها عن بعض مع قوة الانحناء على طول الاتجاه بينها. إذا دفعتها معًا كما في الشكلين (a) و(b)، يُقال إن الانحناء موجب؛ وإذا انفصلت وتشتتت كما في (c)، فإن الانحناء يكون سالبًا.



(a)



(b)



(c)

اجمع نقاط قوة الانحناءات على طول الانجاهات الثلاثة، الشرق والغرب [الرسم البياني (a)]، والشمال والجنوب [الرسم البياني (b)]، والأعلى والأسفل [الرسم البياني (c)]. تنص معادلة أينشتاين للمجال على أن مجموع قوى هذه الانحناءات الثلاثة يتناسب طردياً مع كثافة الكتلة في محيط الجسم (مضروباً في مربع سرعة الضوء لتحويلها إلى كثافة طاقة؛ انظر الإطار 5.2)، مجموعة مع (قيمة ضغط المادة في محيط الجزيئات مضروبة في قيمتها ثلاث مرات).

حتى لو كنت أنا وأنت في نفس التموضع في الزمكان (على سبيل المثال، الطيران فوق باريس، فرنسا، ظهر يوم 14 يوليو 1996)، إذا تحرك أحدنا بالنسبة إلى الآخر، فإن المكان الخاص بك سيكون مختلفاً عن المكان الخاص بي وكذلك كثافة المكان. فالكثافة (على سبيل المثال، كتلة الهواء من حولنا) التي نقيسها أنت ستكون مختلفة عن الكثافة التي أقيسها أنا، كما أن ضغط المادة (على سبيل المثال، ضغط الهواء) الذي نقيسه سيختلف. وبالمثل، اتضح أن مجموع انحناءات الزمكان الثلاثة التي نقيسها أنت سيكون مختلفاً عن المجموع الذي أقيسه أنا. ومع ذلك، يجب أن نجد أنا وأنت أن مجموع الانحناءات التي نقيسها يتناسب مع كثافة الكتلة التي نقيسها بالإضافة إلى 3 أضعاف الضغط الذي نقيسه. وبهذا المعنى، فإن معادلة مجال أينشتاين هي نفسها في كل إطار مرجعي؛ وهذا يتبع/ يطبق/ يحقق مبدأ النسبية لأينشتاين.

في معظم الظروف (على سبيل المثال، في جميع أنحاء النظام الشمسي)، يكون ضغط المادة صغيراً مقارنة بكثافة كتلتها مضروبة في مربع سرعة الضوء، وبالتالي فإن الضغط مساهم غير مهم في انحناء الزمكان؛ إن اعوجاج الزمكان يرجع تقريباً إلى الكتلة فقط. لكن في أعماق النجوم النيوترونية (الفصل الخامس)، وفي عدد قليل من الأماكن الغربية الأخرى، يصبح الضغط مساهماً كبيراً في الاعوجاج.

من خلال التلاعب رياضياً بمعادلة أينشتاين للمجال، لم يكتفِ أينشتاين وغيره من الفيزيائيين بتفسير انحراف ضوء النجوم بسبب الشمس وحركات الكواكب في مداراتها، بما في ذلك الانزياح الشاذ في الحضيض الشمسي لعطارد، بل تنبأوا أيضاً بوجود الثقوب السوداء. (الفصل الثالث)، وموجات الجاذبية (الفصل العاشر)، ومفردات الزمكان (الفصل الثالث عشر)، وربما وجود الثقوب الدودية وآلات الزمن (الفصل الرابع عشر). أما بقية هذا الكتاب فقد خصصته لهذا الإرث من عبقرية أينشتاين.

عندما أتصفح أوراق أينشتاين العلمية المنشورة (وهو تصفح يجب أن أقوم به في الطبعة الروسية لعام 1965 من أعماله المجمعة للأسف، لأنني لا أقرأ اللغة الألمانية ومعظم أوراقه لم تترجم إلى الإنجليزية حتى عام 1993!)، يذهلني التغير العميق الذي طرأ على طبيعة أعماله في عام 1912. فقبل عام 1912، كانت أبحاثه رائعة بسبب أناقتها، وحدها العميق، واستخدامها المتواضع للرياضيات. العديد من الحجج هي نفس تلك التي استخدمناها أنا وأصدقائي في التسعينيات عندما درّسنا دورات عن النسبية. ولم يتعلم أحد كيفية تحسين هذه الحجج. على النقيض من ذلك، بعد عام 1912، كثرت الرياضيات المعقدة في أوراق أينشتاين، على الرغم من أنها عادة ما تكون مقترنة برؤى حول القوانين الفيزيائية. هذا المزيج من الرياضيات والبصيرة الفيزيائية، والذي لم يكن يتمتع به سوى أينشتاين من بين جميع الفيزيائيين العاملين في مجال الجاذبية في الفترة 1912-1915، قاد أينشتاين في النهاية إلى الشكل الكامل لقوانين الجاذبية الخاصة به.

لكن أينشتاين استخدم أدواته الرياضية بشيء من الحماسة. وكما قال هيلبرت لاحقاً: «كل صبي في شوارع جوتنجن يفهم عن الهندسة رباعية الأبعاد أكثر من أينشتاين. ومع ذلك، أو على الرغم منه، فإن أينشتاين هو من قام بالعمل (صاغ قوانين النسبية العامة للجاذبية) وليس علماء الرياضيات». لقد قام بهذا العمل لأن الرياضيات لم تكن كافية؛ وكانت هناك حاجة أيضاً إلى رؤية أينشتاين الفيزيائية الفريدة.

في الواقع، لقد بالغ هيلبرت. كان أينشتاين عالم رياضيات جيداً إلى حد ما، على

الرغم من أنه في التقنية الرياضية لم يكن شخصية مرموقة كما كان في البصيرة الفيزيائية. ونتيجة لذلك، فإن القليل من حجج أينشتاين بعد عام 1912 تقدم اليوم بالطريقة التي قدمها بها أينشتاين. لقد تعلم الناس التحسينات. ومع تحول السعي في فهم قوانين الفيزياء إلى شكل رياضي أكثر بمرور السنوات التي تلت عام 1915، بدأت شخصية أينشتاين المهيمنة التي كان عليها تخفت وتنزوي. لقد مرَّرت الشعلة للآخرين.

1. راجع الملاحظة في صفحة... للحصول على التفاصيل.

2. لم يكن من الواضح تمامًا أن قانون نيوتن للجاذبية يخالف مبدأ النسبية لأينشتاين، لأن أينشتاين اعتمد في صياغة مبدئه على مفهوم الإطار المرجعي القصوري، ولا يمكن استخدام هذا المفهوم في وجود الجاذبية. (لا توجد طريقة لحماية الإطار المرجعي من الجاذبية وبالتالي السماح له بالتحرك فقط تحت تأثير قصوره الذاتي). ومع ذلك، كان أينشتاين مقتنعًا بأنه لا بد من وجود طريقة ما لتوسيع نطاق تأثير مبدأ النسبية الخاص به في عالم الجاذبية (طريقة ما «لتعميمها» لتشمل تأثيرات الجاذبية)، وكان مقتنعًا بأن قانون نيوتن للجاذبية من شأنه أن ينتهك «مبدأ النسبية المعمم» الذي لم تكن قد ظهرت صياغته بعد.

3. الفصل الرابع وخاصة الإطار 4.1.

4. استخدم أينشتاين العبارة الجديدة «التغاير العام» لهذه الخاصية، على الرغم من أنها كانت مجرد امتداد طبيعي لمبدأ النسبية الخاص به.

الفصل الثالث: الثقوب السوداء، الاكتشاف ثم الرفض

وهو الفصل الذي فيه قوانين أينشتاين لاجوجاج الزمن
سوف تتنبأ بالثقوب السوداء ثم سيرفض أينشتاين هذا التنبؤ

كتب ألبرت أينشتاين في ورقة بحثية عام 1939: «النتيجة الأساسية لهذا البحث هي الفهم الواضح لسبب عدم وجود «مفردات سفارتسشيلد» في الواقع الفيزيائي». بهذه الكلمات، أوضح أينشتاين وبشكل قاطع رفضه لإرثه الفكري: الثقوب السوداء التي بدا أن قوانينه للنسبية العامة للجاذبية تتنبأ بها.

حتى الآن، لم يُستتج سوى عدد قليل من خصائص الثقوب السوداء باستخدام قوانين أينشتاين، ولم يكن اسم «الثقوب السوداء» قد صيغ بعد؛ لقد أطلق عليها اسم «مفردة سفارتسشيلد». على أي حال، كان من الواضح أن أي شيء يقع في الثقب الأسود لا يمكن أن يخرج أبدًا ولا يمكنه إرسال الضوء أو أي شيء آخر إلى خارج الثقب الأسود، وكان هذا كافيًا لإقناع أينشتاين ومعظم علماء الفيزياء الآخرين في عصره بأن الثقوب السوداء أجسام غريبة للغاية، ولا ينبغي أن تكون موجودة في الكون الحقيقي. بطريقة ما، يجب أن تحمي قوانين الفيزياء هذا الكون من مثل هذه الوحوش.

- ما الذي كان معروفًا عن الثقوب السوداء عندما رفضها أينشتاين بشدة؟

- ما مدى قوة تنبؤات النسبية العامة بوجود مثل هذه الثقوب؟

- كيف يمكن لأينشتاين أن يرفض هذا التنبؤ ويظل محتفظًا بالثقة بقوانينه للنسبية العامة؟

الإجابات عن هذه الأسئلة لها جذور تعود إلى القرن الثامن عشر.

على مدى القرن الثامن عشر الميلادي، اعتقد العلماء (الذي كان يُطلق عليهم آنذاك فلاسفة الطبيعة) أن الجاذبية محكومة بقوانين نيوتن، وأن الضوء يتكون من كريات (كرات

فائقة الصغر) (جسيمات) تنبعث من مصادرها بسرعة عالية جداً (معقدة). وكان شائعاً أن هذه السرعة تبلغ نحو 300 ألف كيلومتر في الثانية، وذلك بفضل القياسات التلسكوبية للضوء القادم من أقمار المشتري في أثناء دورانها حول كوكبها الأم.

في عام 1783، تجرأ جون ميشيل، وهو فيلسوف طبيعي بريطاني، على الجمع بين وصف الضوء (باعتباره كريات) وقوانين نيوتن للجاذبية، ومن ثم توقع الشكل الذي يجب أن تظهر به النجوم المضغوطة للغاية. لقد فعل ذلك من خلال تجربة فكرية أكررها هنا بصيغة معدلة:

لنفترض أنك أطلقت جسيماً من سطح نجم بسرعة ابتدائية معينة، ثم تركته يتحرك بحرية إلى الأعلى. إذا كانت السرعة الأولية منخفضة للغاية، فإن جاذبية النجم ستبطئ سرعة الجسيم حتى يتوقف ثم تسحبه مرة أخرى إلى سطح النجم. إذا كانت السرعة الأولية عالية بما فيه الكفاية، فإن الجاذبية سوف تبطئ الجسيم ولكنها لن توقفه؛ سوف يتمكن الجسيم من الهروب. يُطلق على الخط الفاصل -بين سرعتين- وهو الحد الأدنى للسرعة الأولية للهروب، اسم «سرعة الهروب (الانفلات)». بالنسبة إلى الجسيم المقدوف من سطح الأرض، تبلغ سرعة الانفلات 11 كيلومتراً في الثانية؛ أما بالنسبة إلى الجسيم المنبعث من سطح الشمس فتبلغ سرعته 617 كيلومتراً في الثانية، أو 0.2 بالمائة من سرعة الضوء.

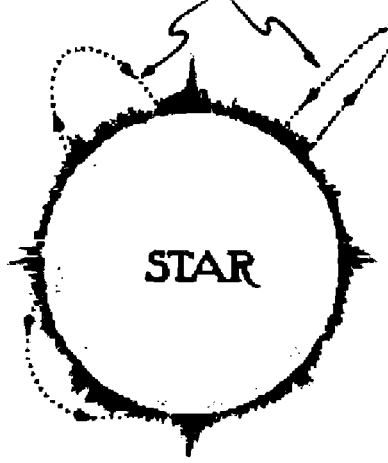
تمكن ميشيل من حساب سرعة الهروب باستخدام قوانين نيوتن للجاذبية، كما استطاع أن يبين أنها تتناسب مع الجذر التربيعي لكثافة النجم مقسوماً على محيطه. وهكذا، بالنسبة إلى النجم ذي الكثافة الثابتة، كلما كان محيطه أصغر، زادت سرعة الهروب. إن سبب ذلك بسيط: كلما كان المحيط أصغر، اقترب سطح النجم من مركزه، وبالتالي زادت قوة الجاذبية على سطحه، ومن ثم أصبح هروب الجسيم أصعب من قوة السحب لجاذبية النجم ويحتاج إلى عمل أكبر (زيادة سرعة الجسيم).

ورأى ميشيل أن هناك محيطاً حرجاً تكون فيه سرعة الهروب هي سرعة الضوء. إذا كانت كريات الضوء تتأثر بالجاذبية بنفس الطريقة التي تتأثر بها أنواع الجسيمات الأخرى، فبالتالي يمكن للضوء بالكاد الهروب من نجم له هذا المحيط الحرج. أما بالنسبة إلى نجم أصغر قليلاً فلا يمكن للضوء الهروب على الإطلاق. عندما يتم إطلاق كرية من الضوء

من نجم كهذا بالسرعة القياسية للضوء والتي تبلغ 299.792 كيلومترًا في الثانية، فإنها ستطير للأعلى في البداية، ثم تتباطأ حتى تتوقف ثم تعود إلى سطح النجم؛ انظر الشكل 3.1.

يستطيع ميشيل حساب المحيط الحرج بسهولة: لقد كان 18.5 كيلومتر، إذا كان للنجم نفس كتلة الشمس، ثم سيصبح المحيط الحرج أطول كلما كانت كتلة النجم أكبر.

Trajectories of light corpuscles



3.1 سلوك الضوء الذي ينبعث من نجم أصغر من المحيط الحرج، كما حسبه جون ميشيل عام 1783 باستخدام قوانين نيوتن للجاذبية ووصف الضوء باعتباره كريات.

لا شيء في قوانين الفيزياء في القرن الثامن عشر يمنع نجمًا مضغوطًا من أن يكون موجودًا في الطبيعة. مما قاد ميشيل إلى التكهن بأن الكون قد يحتوي على عدد كبير من هذه النجوم المظلمة، كل منها يعيش بسعادة داخل محيطه الحرج، وكل منها غير مرئي من الأرض لأن جسيمات الضوء المنبعثة من سطحه تُسحب إلى داخله مرة أخرى بشكل حتمي. لقد كانت هذه النجوم المظلمة هي نسخة القرن الثامن عشر من الثقوب السوداء. أبلغ ميشيل -الذي كان عميدًا لجامعة ثورنهيل Thornhill في يوركشاير بإنجلترا- تنبؤه باحتمال وجود النجوم المظلمة للجمعية الملكية في لندن في 27 نوفمبر 1783. وقد أثار تقريره ضجة كبيرة بين فلاسفة الطبيعة البريطانيين. وبعد ثلاثة عشر عامًا، نشر

الفيلسوف الطبيعي الفرنسي بيير سيمون دو لابلاس نفس التنبؤ في الطبعة الأولى من عمله الشهير كتاب النظام العالمي (بالفرنسية Le Systeme du Monde)، من دون استخدام عمل ميشيل السابق كمرجع في قائمة أبحاثه. احتفظ لابلاس بتنبؤه بالنجم المظلم في الطبعة الثانية عام (1799)، ولكن بحلول الطبعة الثالثة عام (1808)، كان اكتشاف توماس يونج لتداخل الضوء مع نفسه 1 قد أجبر فلاسفة الطبيعة على التخلي عن وصف الضوء باعتباره كريات. واستبدلوا به وصف الموجة الذي ابتكره كريستيان هوجنس -ولم يكن من الواضح على الإطلاق كيف يمكن لهذا الوصف الموجي أن يتماشى مع قوانين نيوتن للجاذبية من أجل حساب تأثير جاذبية النجم على الضوء الذي ينبعث منه. وسنفترض أن هذا كان السبب في حذف لابلاس لمفهوم النجم المظلم من الطبعة الثالثة والطبعات اللاحقة من كتابه.

فقط في نوفمبر 1915، بعد أن صاغ أينشتاين رياضياً قوانينه النسبية العامة للجاذبية، اعتقد الفيزيائيون مرة أخرى أنهم فهموا الجاذبية والضوء بشكل جيد بما يكفي لحساب تأثير جاذبية النجم على الضوء الذي يشعه. وبالتالي عند هذه النقطة بالذات عادوا بثقة إلى النجوم المظلمة (الثقوب السوداء) لميشيل ولاپلاس.

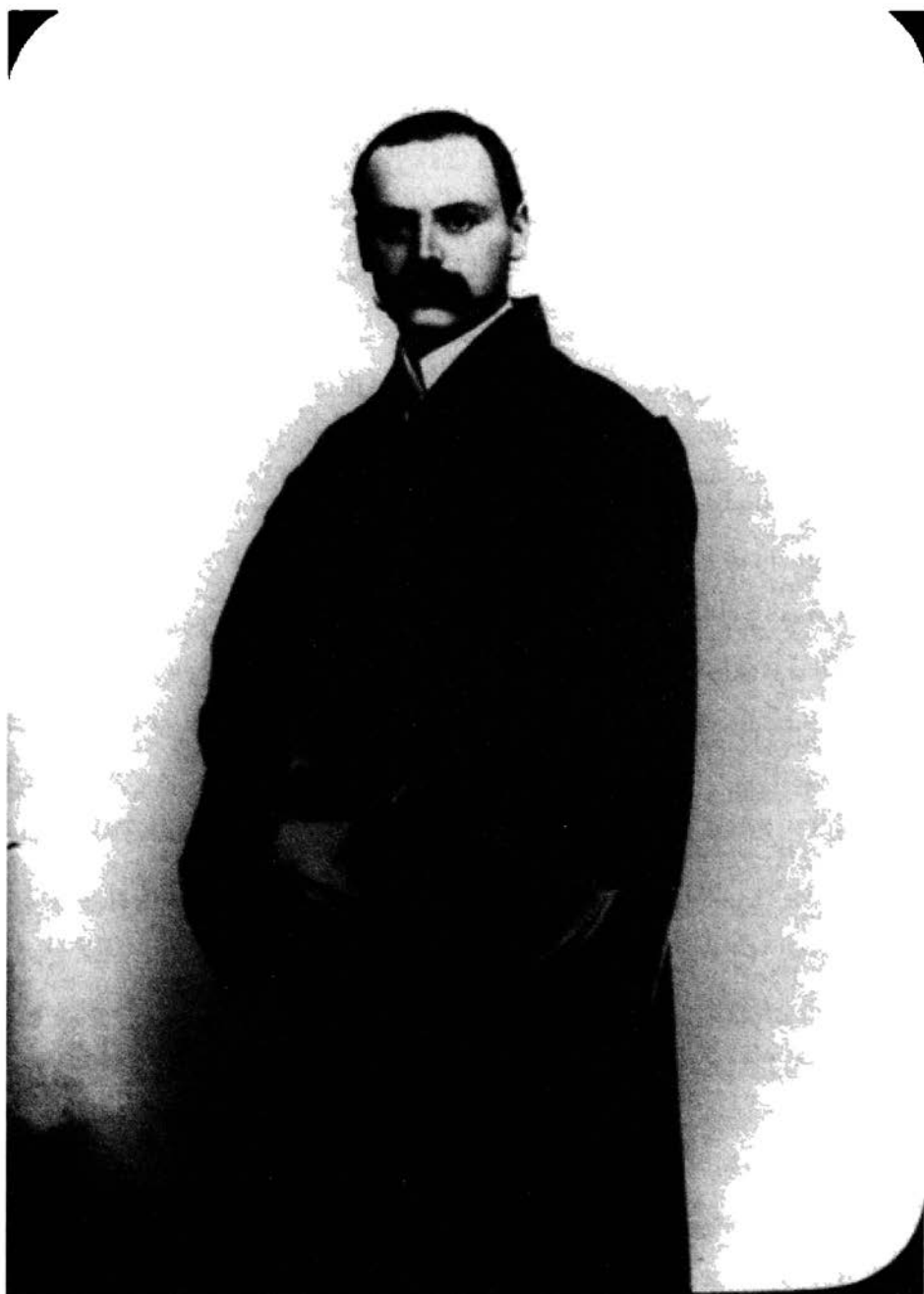
بدأ كارل شفارتزشيلد الخطوة الأولى، والذي كان يعد أحد أبرز علماء الفيزياء الفلكية في أوائل القرن العشرين. قرأ شفارتزشيلد، الذي كان يخدم في الجيش الألماني على الجبهة الروسية في الحرب العالمية الأولى، صياغة أينشتاين الرياضية للنسبية العامة في عدد 25 نوفمبر 1915 من تقرير الأكاديمية البروسية للعلوم Proceedings of the Prussian Academy of Sciences. وعلى الفور تقريباً، شرع في اكتشاف التنبؤات التي ربما قدمتها قوانين الجاذبية الجديدة لأينشتاين بشأن النجوم.

وبما أن التحليل الرياضي لنجم يدور أو غير كروي سيكون أمراً معقداً للغاية، فقد اقتصر شفارتزشيلد على النجوم التي لا تدور على الإطلاق والتي لديها شكل كروي دقيق، ولجعل حساباته أكثر سهولة، سعى أولاً إلى وصف رياضي لظاهر النجم (الشكل الخارجي) وآخر الوصف الرياضي لباطن النجم إلى وقت لاحق. وفي غضون أيام قليلة تحصل على الإجابة، لقد حسب بالتفصيل الدقيق، من معادلة المجال الجديدة لأينشتاين، انحناء الزمكان خارج أي نجم كروي لا يلف حول نفسه (أي لا يدور تحت تأثير كمية الحركة الدورانية). لقد كانت حساباته أنيقة وجميلة، وكان من المقدر لهندسة انحناءات

الزمكان التي تنبأت بها - وهي هندسة شفارتسشيلد كما ستعرف بعدها بوقت قصير - أن يكون لها تأثير هائل على فهمنا للجاذبية والكون.

أرسل شفارتسشيلد إلى أينشتاين بالبريد ورقة بحثية تصف حساباته، وقدمها أينشتاين نيابة عنه في اجتماع الأكاديمية البروسية للعلوم في برلين في 13 يناير 1916. وبعد عدة أسابيع، قدم أينشتاين للأكاديمية ورقة ثانية كتبها شفارتسشيلد تحت عنوان: حساب دقيق لانحناء الزمكان داخل النجم. وبعد أربعة أشهر فقط، توقفت إنتاجية شفارتسشيلد الرائعة: ففي التاسع عشر من يونيو، كُلف أينشتاين بمهمة حزينة وهي إبلاغ الأكاديمية بوفاة كارل شفارتسشيلد بسبب مرض أصيب به على الجبهة الروسية.

هندسة شفارتسشيلد هي أول مثال قابلنا في هذا الكتاب عن انحناء الزمكان. ولهذا السبب، ولأنه عنصر أساسي في خصائص الثقوب السوداء، فسوف نستعرضه بالتفصيل. لقد سيطرت على أفكارنا طوال التاريخ عن المكان والزمن اعتبارهما «قماشًا» مطلقًا وموحدًا رباعي الأبعاد للزمكان، فأصبح الآن من المناسب وصف هندسة شفارتسشيلد بلغة الزمكان المنحني (المعوج) رباعي الأبعاد. ومع ذلك، فإن تجربتنا اليومية مع المكان ثلاثي الأبعاد والزمن أحادي البعد «غير موحدة»، لذا سأقدم وصفًا يُقسّم فيه الزمكان المعوج إلى مكان معوج بالإضافة إلى زمن معوج.



كارل شفارتسشيلد في ثوبه الأكاديمي في جوتنجن، ألمانيا.
[مقدمة من الأرشفة المرئي لإميليو سيجري بالمعهد الأمريكي للفيزياء]

نظراً لأن المكان والزمن «نسبيان» (يختلف مكاني (أنا) عن مكانك (أنت) وزمني (أنا) عن زمرك (أنت)، إذا تحرك أحدنا بالنسبة إلى الآخر 2)، فإن انقسامًا كهذا يتطلب أولاً اختيار إطار مرجعي - ما يعني اختيار حالة الحركة. بالنسبة إلى النجم، هناك خيار طبيعي، والذي فيه يكون النجم في حالة سكون؛ هذا هو النجم الذي يحوي (يمتلك) هذا الإطار المرجعي. بمعنى آخر، من الطبيعي أن نفحص المكان الذي يحويه النجم وكذلك الزمن بالنجم، وليس المكان والزمن لشخص يتحرك بسرعة عالية عبر النجم.

للمساعدة في تصور انحناء (اعوجاج) لمكان النجم، سأستخدم رسمًا يسمى مخطط التضمين، نظرًا لأن مخططات التضمين ستلعب دورًا رئيسيًا في الفصول المستقبلية، سوف أقدم المفهوم بعناية، بمساعدة مثال توضيحي.

تخيل أن هناك عائلة من المخلوقات الشبيهة بالإنسان تعيش في عالم له بُعدين مكانيين فقط. سيصبح الكون الذي يعيشون فيه هو سطح منحنٍ، يشبه الوعاء الموضح في الشكل 3.2. إنهم يشبهون عالمهم ثنائي الأبعاد، لذا فهم مخلوقات رقيقة متناهية الصغر، يعيشون بشكل عمودي على السطح. بالإضافة إلى ذلك، هم لا يستطيعون الرؤية فوق السطح، بل تتحقق الرؤية لديهم عن طريق الأشعة الضوئية التي تتحرك داخل هذا السطح ولا تغادره أبدًا. وبالتالي، فإن هذه «المخلوقات ثنائية الأبعاد» - كما سأسميها - ليس لديها أي طريقة على الإطلاق للحصول على أي معلومات عن أي شيء خارج عالمها ثنائي الأبعاد.

يمكن لهذه المخلوقات ثنائية الأبعاد استكشاف هندسة عالمها ثنائي الأبعاد عن طريق إجراء قياسات على الخطوط المستقيمة والمثلثات والدوائر. خطوطها المستقيمة هي «الجيويدسية» - التي ناقشناها في الفصل الثاني كما في (الشكل 2.4 والنص المرتبط به): ستجد الخطوط الأكثر استقامة الموجودة في عالمهم ثنائي الأبعاد في قاع «وعاء» الكون الذي يعيشون فيه، والذي نراه في الشكل 3.2 كقطعة من كرة، ستجد أيضًا أن الخطوط المستقيمة هي في الحقيقة أجزاء من دوائر عظيمة مثل خط استواء الكرة الأرضية أو خطوط الطول الثابتة. أما خارج حافة الوعاء، فإن الكون الذي يعيشون فيه مسطح، لذا فإن الخطوط المستقيمة في «كونهم المسطح خارج حافة الوعاء» هي ما يمكن أن نعتبره خطوطاً مستقيمة عادية.

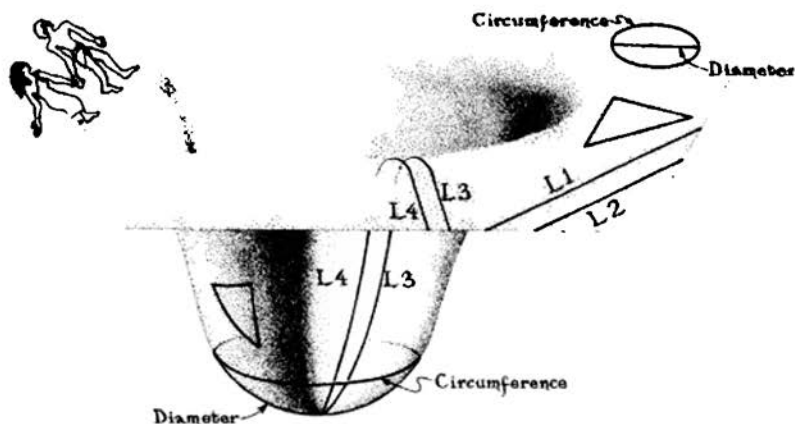
إذا درست المخلوقات ثنائية الأبعاد أي زوج من الخطوط المستقيمة المتوازية في

الجزء الخارجي المسطح من عالمها (على سبيل المثال، L1 و L2 في الشكل 3.2)، فبصرف النظر عن مدى اتباع المخلوقات الثنائية لتلك الخطوط، فلن تراها تتقاطع أبدًا. بهذه الطريقة، تكتشف الكائنات تسطح المنطقة الخارجية. من ناحية أخرى، إذا بنوا الخطوط المستقيمة المتوازية L3 و L4 خارج حافة الوعاء، ثم اتبعوا تلك الخطوط في منطقة الوعاء، مع إبقائهم دائمًا مستقيمين قدر الإمكان (مع الحفاظ على الجيوديسية)، فسوف يرون الخطوط متقاطعة عند الجزء السفلي من الوعاء. وبهذه الطريقة، سيكتشفون أن منطقة الوعاء الداخلي من كونهم منحنية.

يمكن للمخلوقات ثنائية الأبعاد أيضًا اكتشاف أن المنطقة الخارجية مستوية وأن المنطقة الداخلية منحنية عن طريق قياس الدوائر والمثلثات (الشكل 3.2). في المنطقة الخارجية، محيطات جميع الدوائر تساوي $(3.14159265\dots)\pi$ ضرب أقطارها (أي ما قيمته حاصل ضرب π في قطر الدائرة). في المنطقة الداخلية، تكون محيطات الدوائر أقل من π ضرب أقطارها (أي أن محيط الدوائر في المناطق المنحنية يصبح أقل من حاصل ضرب π في قطر الدائرة)؛ على سبيل المثال، الدائرة الكبيرة المرسومة بالقرب من قاع الوعاء في الشكل 3.2 محيطها يساوي حاصل ضرب 2.5 في قطر الدائرة. عندما تقوم المخلوقات ثنائية الأبعاد ببناء مثلث أضلاعه عبارة عن خطوط مستقيمة (جيوديسية) ثم تضيف الزوايا الداخلية للمثلث، فإنها تحصل على 180 درجة في المنطقة الخارجية المسطحة، أما في المنطقة الداخلية المنحنية فتصبح أكبر من 180 درجة.

بعد أن يكتشفوا من خلال هذه القياسات أن كونهم منحني، ربما تبدأ المخلوقات ثنائية الأبعاد في التكهن بأن كونهم موجود في مكان ثلاثي الأبعاد؛ أي أنه مضمن فيه. وقد يطلقون على هذا المكان ثلاثي الأبعاد اسم المكان-الفائق، ثم سيتكهنون بخصائصه؛ على سبيل المثال، قد يفترضون أنه «مسطح» بالمعنى الإقليدي، حيث إن الخطوط المستقيمة المتوازية فوق هذا السطح لا تتقاطع أبدًا. أنا وأنت لا نواجه صعوبة في تصور مثل هذا المكان-الفائق؛ إنه المكان ثلاثي الأبعاد في الشكل 3.2، وهو المكان الذي نتعاطى معه في حياتنا اليومية. أما الكائنات ثنائية الأبعاد بخبرتها المحدودة في مجال ثنائي الأبعاد، فستواجه صعوبة كبيرة في تصورها. بالإضافة إلى أنه لا توجد طريقة تمكّنهم من معرفة ما إذا كان مثل هذا المكان الفائق موجودًا بالفعل. لا يمكنهم أبدًا الخروج من عالمهم ثنائي الأبعاد إلى البعد الثالث للفضاء الفائق، ولأنهم لا يرون إلا عن طريق أشعة الضوء التي

تظل دائمًا داخل عالمهم، لذا فإنهم لن يتمكنوا أبدًا من الرؤية في المكان الفائق. بالنسبة إليهم، سيكون المكان الفائق افتراضيًا تمامًا.



3.2 كون ثنائي الأبعاد تسكنه مخلوقات ثنائية الأبعاد.

البُعد الثالث للمكان-الفائق لا علاقة له بالبُعد الزمني للمخلوقات ثنائية الأبعاد، وهم قد يفكرون فيه أيضًا على أنه بُعد ثالث. عند التفكير في المكان-الفائق، يجب على المخلوقات في الواقع أن تفكر في أربعة أبعاد: اثنان لفضاء كونهم، وواحد لزمانه، وواحد للبُعد الثالث للمكان-الفائق.

نحن مخلوقات ثلاثية الأبعاد، ونعيش في فضاء منحني ثلاثي الأبعاد. إذا أردنا إجراء قياسات لهندسة المكان الخاص بنا داخل النجم وبالقرب منه -هندسة شفارتسكيلد- فسوف نكتشف أنه منحني بطريقة تشبه إلى حد كبير تلك الموجودة في عالم المخلوقات ثنائية الأبعاد.

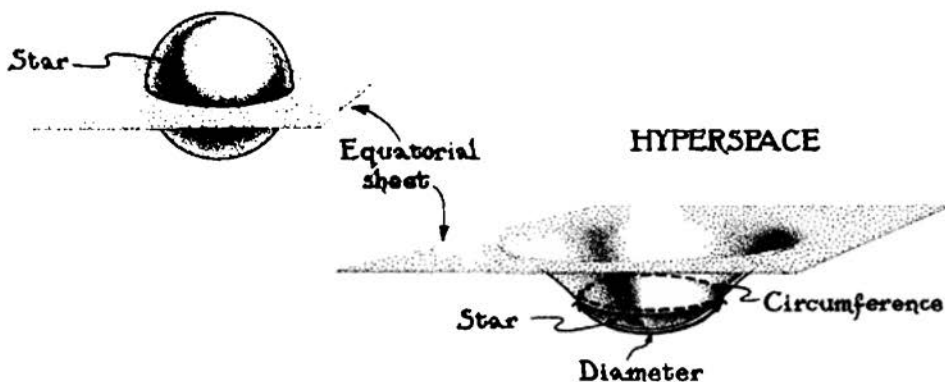
يمكننا التكهن بمكان-فائق ذي أبعاد أعلى، والذي يتضمن (يحتوي على) مكانا المنحني ثلاثي الأبعاد. لقد اتضح أن مثل هذا المكان-الفائق يجب أن يكون له ستة أبعاد حتى يتمكن من استيعاب المكان المنحني ثلاثي الأبعاد مثل مكاننا داخل نفسه. (وعندما نتذكر أن كوننا له أيضًا بُعد زمني، يجب علينا أن نفكر في سبعة أبعاد إجمالًا).

حاليًا، سيصبح من الصعب جدًا بالنسبة إليّ أن أتخيل مكانا ثلاثي الأبعاد ضمن مكان

فاتق سداسي الأبعاد مقارنة بالمخلوقات ثنائية الأبعاد التي تتخيل فضاءها ثنائي الأبعاد مضمناً في مكان-فاتق ثلاثي الأبعاد. ومع ذلك، ثمة خدعة ستساعدنا بشكل كبير، وهي الخدعة الموضحة في الشكل 3.3.

يوضح الشكل 3.3 تجربة ذهنية: بافترض إدخال صحيفة رقيقة من المادة عبر نجم في مستوى خط استوائه (أعلى اليسار)، بحيث تقسم هذه الصحيفة النجم إلى نصفين متطابقين تماماً فوق هذه الصحيفة الافتراضية وتحتها. على الرغم من أن هذه الصحيفة التي تقسم النجم عند خط استوائه تبدو مسطحة في الصورة، فإنها ليست مسطحة في الحقيقة. تسبب كتلة النجم اعوجاجاً للمكان ثلاثي الأبعاد داخل النجم وحوله بطريقة لا تستطيع الصورة العلوية اليسرى نقلها، ويؤدي هذا الاعوجاج إلى انحناء الصحيفة التي وضعناها عند خط الاستواء بطريقة لا تظهرها الصورة. يمكننا اكتشاف انحناء تلك الصحيفة عن طريق إجراء قياسات هندسية عليها في المكان الفيزيائي الحقيقي، بنفس الطريقة التي تقوم بها المخلوقات ثنائية الأبعاد بإجراء قياسات في المكان ثنائي الأبعاد في الكون الذي نعيش فيه. تكشف قياسات كهذه أن الخطوط المستقيمة المتوازية في البداية تتقاطع بالقرب من مركز النجم، وأن محيط أي دائرة داخل النجم أو بالقرب منه أقل من قيمة π مضروبة في قطرها، ومجموع الزوايا الداخلية للمثلثات أكبر من 180 درجة. تنبأ حل شفارتسشيلد لمعادلة أينشتاين بتفاصيل هذه التشوهات للمكان المنحني.

للمساعدة في تصور انحناء شفارتسشيلد هذا، يمكننا، مثل المخلوقات ثنائية الأبعاد، أن نتخيل هذه الصحيفة الاستوائية من المكان المنحني ثلاثي الأبعاد لكوننا الحقيقي، وتضمينها في مكان خيالي مسطح ثلاثي الأبعاد (اليمن إلى الأسفل في الشكل 3.3). في المكان-الفائق غير المنحني، يمكن للصحيفة الحفاظ على هندستها المنحنية فقط عن طريق ثنيها للأسفل مثل الوعاء. تُسمى هذه المخططات المكونة من صحائف ثنائية الأبعاد من الكون المنحني الذي نعيش فيه، والمضمنة في مكان-فاتق افتراضي مسطح ثلاثي الأبعاد، بمخططات التضمين.



3.3 انحناء المكان ثلاثي الأبعاد داخل النجم وحوله (أعلى اليسار)، كما هو موضح بواسطة مخطط التضمين (أسفل اليمين). هذا هو الانحناء الذي تنبأ به حل شفارتشيلد لمعادلة أينشتاين للمجال.

من المغري التفكير في البعد الثالث للمكان-الفائق على أنه نفس البعد المكاني الثالث لكوننا. وعلينا أن نتجنب هذا الإغراء. البعد الثالث للمكان-الفائق ليس له أي علاقة على الإطلاق بأي من أبعاد كوننا. إنه بُعد لا يمكننا أبداً الذهاب إليه أو رؤيته، ولا يمكننا أبداً الحصول على أي معلومات منه؛ إنه بُعد افتراضي بشكل بحت. ومع ذلك، يبدو أنها فكرة مفيدة. إنها تساعدنا على تصور هندسة شفارتشيلد، وستساعدنا لاحقاً في هذا الكتاب على تصور أشكال هندسية أخرى للفضاء المنحني: تلك الخاصة بالثقوب السوداء، وموجات الجاذبية، والمفردات، والثقوب الدودية (الفصول 6 و7 و10 و13 و14).

كما يظهر مخطط التضمين في الشكل 3.3، فإن هندسة شفارتشيلد للصحيفة الاستوائية للنجم هي من الناحية النوعية نفس هندسة عالم المخلوقات ثنائية الأبعاد: الهندسة داخل النجم تشبه الوعاء ومنحنية؛ بعيداً عن النجم تصبح مسطحة. كما هي الحال مع الدائرة الكبيرة في وعاء المخلوقات ثنائية الأبعاد (الشكل 3.2)، كذلك هنا أيضاً (الشكل 3.3)، يكون محيط النجم مقسوماً على قطره أقل من π . بالنسبة إلى شمسنا، من المتوقع أن تكون نسبة المحيط إلى القطر أقل من π بعدة أجزاء في المليون؛ بمعنى آخر، المكان داخل الشمس مسطح إلى عدة أجزاء في المليون. ومع ذلك، إذا احتفظت الشمس بكتلتها نفسها، وبدأ محيطها يقل تدريجياً، فإن الانحناء بداخلها سيزيد تدريجياً وسيصبح أقوى وأقوى، وسيصبح الانحدار لأسفل الوعاء في مخطط التضمين في الشكل 3.3 أكثر وضوحاً، وستصبح نسبة المحيط إلى القطر أقل بكثير من π .

نظرًا لأن المكان يختلف باختلاف الإطارات المرجعية [«فضاؤك عبارة عن مزج من مكاني وزمني، إذا تحرك أحدنا بالنسبة إلى الآخر»]، فإن تفاصيل الانحناء المكاني للنجم ستكون مختلفة عند قياسها في إطار مرجعي يتحرك بسرعة عالية بالنسبة إلى النجم، عما إذا قيست في الإطار الذي يكون فيه النجم في حالة سكون. بالنسبة إلى المكان من خلال الإطار المرجعي عالي السرعة، يكون النجم مضغوطاً (منسحقاً) إلى حدٍّ ما بشكل متعامد مع اتجاه حركته، وبالتالي فإن مخطط التضمين يشبه إلى حد كبير الشكل 3.3، ولكن مع الضغط على الوعاء بشكل عرضي مما يعطي شكل مستطيل. هذا الانضغاط هو شكل المكان المنحني لانكماش الفضاء الذي اكتشفه فيتزجيرالد في كون بلا جاذبية (الفصل الأول).

لا يصف حل سفارتشيلد لمعادلة المجال لأينشتاين هذا الانحناء (أو الاعوجاج) للمكان فحسب، بل يصف أيضًا الاعوجاج بالقرب من النجم، وهو الاعوجاج الذي تسبب فيه الجاذبية القوية للنجم. أما بالنسبة إلى الإطار المرجعي في حالة سكون مقارنة بالنجم، ولا يطير بجواره بسرعة عالية، فإن هذا الاعوجاج تحديدًا هو على وجه الدقة تمدد الزمن بسبب الجاذبية الذي ناقشناه في الفصل الثاني (الإطار 2.4 والمناقشة المرتبطة به): بالقرب من سطح النجم يتدفق الزمن بشكل أبطأ من المناطق البعيدة عن النجم؛ وفي مركز النجم يتدفق بشكل أكثر بطئًا.

في حالة الشمس، يكون الاعوجاج صغيرًا: على سطح الشمس، يجب أن يتدفق الزمن بشكل أبطأ بمقدار جزأين من المليون (أي ما يعادل 64 ثانية خلال سنة واحدة) مقارنة بالمناطق البعيدة عن الشمس، وفي مركز الشمس يجب أن يتدفق بشكل أبطأ من المناطق البعيدة عن الشمس بنحو جزء واحد في 100000 (5 دقائق خلال سنة واحدة). ومع ذلك، إذا احتفظت الشمس بنفس كتلتها وانكماش محيطها بحيث أصبح سطحها أقرب إلى مركزها فإن جاذبيتها ستكون أقوى، وبالتالي فإن تمدد الزمن بسبب الجاذبية - أي اعوجاج الزمن - سيصبح أكبر.

إحدى نتائج هذا الاعوجاج هي الانزياح الأحمر بسبب الجاذبية للضوء المنبعث من سطح النجم. وبما أن تردد تذبذب الضوء محكوم بتدفق الزمن في المكان الذي ينبعث منه الضوء، فإن الضوء الخارج من الذرات الموجودة على سطح النجم سيكون له تردد أقل عندما يصل إلى الأرض من الضوء المنبعث من نفس أنواع الذرات في الفضاء بين-النجمي. سينخفض التردد بنفس المقدار الذي يتباطأ به تدفق الزمن. التردد الأقل يعني

طولاً موجياً أطول، لذلك يجب أن ينزاح الضوء الصادر من النجم نحو الطرف الأحمر من الطيف بنفس مقدار تمدد الزمن على سطح النجم.

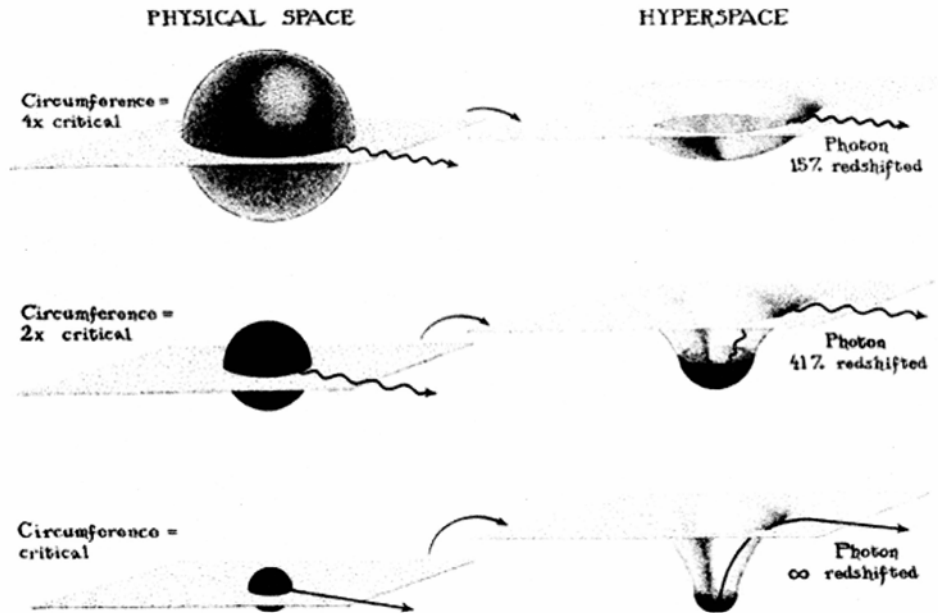
على سطح الشمس، يبلغ تمدد الزمن جزأين من المليون، وبالتالي فإن الانزياح الأحمر بسبب الجاذبية للضوء الذي يصل إلى الأرض من الشمس يجب أن يكون أيضاً جزأين من المليون. كان هذا انزياحاً أحمر صغيراً جداً بحيث لم يمكن قياسه نهائياً في عصر أينشتاين، ولكن في أوائل الستينيات، بدأت التكنولوجيا بالحقاق بقوانين أينشتاين في الجاذبية: قاس جيم برولت من جامعة برينستون من خلال تجربة دقيقة للغاية الانزياح الأحمر لضوء الشمس؛ لقد حصل على نتيجة تتفق تماماً مع تنبؤات أينشتاين.

في غضون سنوات قليلة بعد وفاة شفارتسشيلد المفاجئة، أصبحت هندسة الزمكان الخاصة به أداة عمل قياسية للفيزيائيين وعلماء الفيزياء الفلكية. كثير من الناس -وأينشتاين من بينهم- درسوها وحسبوا آثارها. اتفق الجميع وأخذوا على محمل الجد الاستنتاج القائل بأنه إذا كان محيط النجم كبيراً إلى حد ما مثل الشمس، فإن الزمكان الموجود بداخله وحوله يجب أن يكون منحنيًا بشكل بسيط للغاية، ويجب أن يتغير لون الضوء المنبعث من سطحه -والذي تستقبله الأرض- بشكل طفيف نحو اللون الأحمر. واتفق الجميع أيضاً على أنه كلما كان النجم مضغوطاً أكثر، زاد حجم اعوجاج الزمكان الخاص به، وزاد الانزياح الأحمر بسبب الجاذبية للضوء الخارج من سطحه. ومع ذلك، كان عدد قليل منهم على استعداد لأخذ التوقعات المتطرفة التي قدمتها هندسة شفارتسشيلد للنجوم المضغوطة جداً على محمل الجد (الشكل 3.4):

تنبأت هندسة شفارتسشيلد بوجود محيط حرج لكل نجم اعتماداً على كتلته، وهو نفس المحيط الحرج الذي اكتشفه جون ميشيل وبيير سيمون لابلاس قبل أكثر من قرن: 18.5 كيلومتر مرة من كتلة النجم المحسوبة بوحدة كتلة الشمس. إذا كان المحيط الفعلي للنجم أكبر من هذا المحيط الحرج بمعامل 4 (الجزء العلوي من الشكل 3.4)، فإن المكان النجمي سيكون منحنيًا بشكل معتدل كما هو موضح، وستدقق الزمن على سطحه بشكل أبداً بنسبة 15 بالمائة من المناطق البعيدة عن النجم، وسينزاح الضوء المنبعث من سطحه نحو الطرف الأحمر من الطيف بنسبة 15 بالمائة. إذا كان محيط النجم أصغر؛ أي ضعف المحيط الحرج فقط (الجزء الأوسط من الشكل 3.4)، فسيكون مكانه

منحنياً بقوة أكبر، وستندفق الزمن على سطحه بشكل أبطأ بنسبة 41 بالمائة من المناطق البعيدة عن النجم، وسوف ينزاح الضوء من سطحه نحو الأحمر بنسبة 41 بالمائة.

بدأت هذه التوقعات مقبولة ومعقولة. ما لم يبدو معقولاً على الإطلاق بالنسبة إلى الفيزيائيين وعلماء الفيزياء الفلكية في العشرينيات، أو حتى في أواخر الستينيات، هو التنبؤ بنجم محيطه الفعلي هو نفس محيطه الحرج (الجزء السفلي من الشكل 3.4). بالنسبة إلى نجم كهذا، سيصبح مكانه منحنياً بقوة أكبر وسيتمدد الزمن على سطح النجم بشكل لا نهائي؛ لن يتدفق الزمن على الإطلاق، سيتجمد. وبالمقابل، بصرف النظر عن لون الضوء عندما يبدأ الانتقال إلى الأعلى من سطح النجم، يجب أن ينزاح إلى ما وراء اللون الأحمر، إلى ما وراء الأشعة تحت الحمراء، وإلى ما بعدها. الأطوال الموجية الراديوية ستصبح أطوالاً موجية لا نهائية؛ وهو أمر يستحيل وجوده. في اللغة الحديثة يقع سطح النجم ذي المحيط الحرج بالضبط داخل أفق الثقب الأسود؛ أي أن النجم وبفعل جاذبيته القوية يخلق أفق الثقب الأسود حول نفسه.



3.4 تنبؤات النسبية العامة بشأن انحناء الفضاء والانزياح الأحمر للضوء الصادر عن ثلاثة نجوم مضغوطة داخلياً بشدة لها نفس الكتلة ولكن محيطاتها مختلفة. الأول أكبر بأربع مرات من المحيط الحرج، والثاني أكبر بمرتين من المحيط الحرج، والثالث له نفس محيطه الحرج بدقة. في اللغة الحديثة، سطح النجم الثالث هو أفق الثقب الأسود.

خلاصة القول في مناقشة هندسة سفارتسشيلد هي نفسها التي توصل إليها ميشيل ولا بلاس: ينبغي أن يكون النجم الصغير، والذي يبلغ محيطه المحيط الحرج، مظلمًا تمامًا عند النظر إليه من مسافة بعيدة؛ لا بد أنه ما نسميه الآن بالثقب الأسود. ملخص الفكرة هي نفسها، ولكن الآلية مختلفة تمامًا:

اعتقد ميشيل ولا بلاس من خلال استخدامهما لفيزياء نيوتن للمكان والزمن باعتبارهما مطلقين وأن سرعة الضوء نسبية؛ فبالنسبة إلى نجم أصغر قليلًا من المحيط الحرج توشك كريات الضوء على الإفلات من سطح النجم. سوف تنتقل إلى ارتفاعات كبيرة فوق النجم، أبعد من أي كوكب يدور حوله، ولكن في أثناء صعودها، تبطنها جاذبية النجم، ثم تتوقف هذه الكريات في مكان ما أقصر في المسافة من الفضاء بين-النجوم، ثم تستدير هذه الكريات ليسحبها النجم مرة أخرى. على الرغم من أن المخلوقات الموجودة على كوكب يدور حول هذا النجم يمكنها رؤية النجم من خلال ضوءه بطيء الحركة (لأنه لن يكون مظلمًا بالنسبة إليهم)، إلا أننا -نحن الذي نعيش بعيدًا على الأرض- لم نتمكن من رؤية ضوء هذا النجم على الإطلاق. ولن يتمكن ضوء النجم من الوصول إلينا. بالنسبة إلينا سيكون النجم أسود بالكامل.

على النقيض من ذلك، يتطلب انحناء الزمكان لسفارتسشيلد أن ينتشر الضوء دائمًا بنفس السرعة الكونية أو المعممة؛ والذي لا يمكن إبطاؤه أبدًا (سرعة الضوء مطلقة، لكن المكان والزمن نسبيان). ومع ذلك، إذا انبعث الضوء من المحيط الحرج، يجب أن ينزاح الضوء في الطول الموجي بمقدار لا نهائي، في حين ينتقل لأعلى مسافة متناهية الصغر. (يجب أن يكون انزياح الطول الموجي لا نهائيًا لأن تدفق الزمن يتمدد بشكل لا نهائي عند الأفق، ويتغير الطول الموجي دائمًا بنفس المقدار مع تمدد الزمن). إن هذا التحول اللا نهائي لطول الموجة يزيل كل طاقة الضوء؛ وعندها يختفي الضوء من الوجود! وبالتالي، بصرف النظر عن مدى قرب الكوكب من المحيط الحرج، لا تستطيع المخلوقات الموجودة عليه رؤية أي ضوء يشعه النجم على الإطلاق.

وفي الفصل السابع، سندرس سلوك الضوء إذا أمكن رؤيته داخل المحيط الحرج للثقب الأسود، وسنكتشف أنه لا يختفي من الوجود بعد كل شيء. بل إنه ببساطة يصبح غير قادر على الهروب من المحيط الحرج (أفق الثقب) على الرغم من أنه يتحرك نحو الخارج بالسرعة القياسية الكونية البالغة 299.792 كيلومترًا في الثانية. لكن ونحن في بداية الكتاب، لسنا مستعدين بعد لفهم مثل هذا السلوك الذي يبدو متناقضًا. يجب علينا أولاً أن نبني فهمنا لأمر آخرى، كما فعل الفيزيائيون خلال العقود ما بين عامي 1916 و1960.

خلال عشرينيات وثلاثينيات القرن العشرين، كان ألبرت أينشتاين وعالم الفيزياء الفلكية البريطاني آرثر إدينجتون من أشهر خبراء العالم في النسبية العامة. لقد فهم آخرون النسبية، لكن أينشتاين وإدينجتون هما من عزفا لحن فكرتها. حين كان عدد قليل من العلماء الآخرين على استعداد لأخذ الثقوب السوداء على محمل الجد، فإن أينشتاين وإدينجتون لم يكونا من تلك الفئة. ليست للثقوب السوداء «رائحة طيبة»؛ هذه الثقوب السوداء غريبة الأطوار بشكل وقح، فقد انتهكت حدس أينشتاين وإدينجتون حول الكيفية التي يجب أن يتصرف بها كوننا.

في عشرينيات القرن الماضي، يبدو أن أينشتاين قد تعامل مع هذه القضية بتجاهل تام. لم يدفع أحد بالثقوب السوداء كتنبؤ جدي، لذلك لم تكن هناك حاجة كبيرة إلى إحراز تقدم في هذا الأمر لتصحيح الأمور. وبما أن ألغاز الطبيعة الأخرى كانت أكثر إثارة لاهتمام أينشتاين وحيرته، فقد وجّه طاقاته إلى تساؤلات أخرى.

اتخذ إدينجتون في العشرينيات من القرن الماضي نهجًا أكثر غرابة. لقد كان أحمق إلى حدّ ما، إنه يستمتع بنشر العلوم، وما دام لا أحد يتعاطى مع الثقوب السوداء على محمل الجد، فقد كانت بمثابة لعبة لطيفة يستعرضها أمام الآخرين.

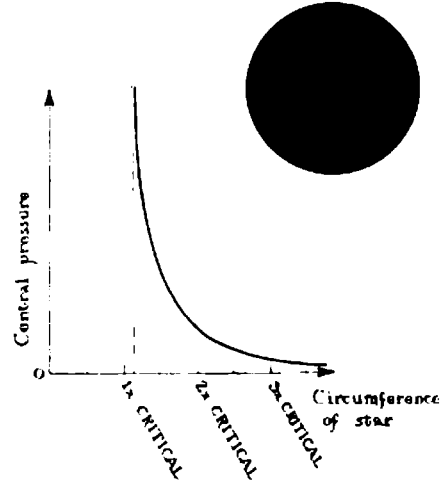
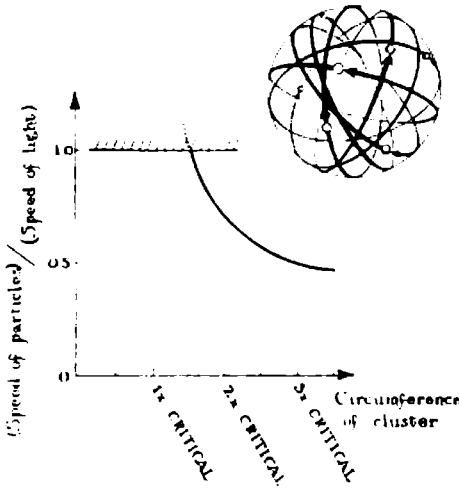
وهكذا نجده يذكر عام 1926 في كتابه البنية الداخلية للنجوم أنه لا يمكن لأي نجم قابل للرصد أن يكون مضغوطًا بشكل أقل من المحيط الحرج، كتب نصًا: «أولاً، إن قوة الجاذبية ستكون كبيرة لدرجة أن الضوء لن يستطيع الإفلات منها، سترتد الأشعة إلى النجم كما يعود الحجر إلى الأرض. ثانيًا، سيكون الانزياح الأحمر للخطوط الطيفية كبيرًا جدًا بحيث إن الطيف سيستمر في الانزياح حتى يختفي. ثالثًا، ستنجج الكتلة انحناءً كبيرًا لمقياس الزمكان بحيث ينفلق المكان حول النجم، وسيتركنا بالخارج (أي في لا مكان)».

لقد كان الاستنتاج الأول هو نسخة فيزياء نيوتن عن الضوء الذي لا ينفلت؛ والثاني كان وصفًا نسبيًا شبه دقيق؛ أما الثالث فكان مبالغة نموذجية من إدينجتون. كما يرى المرء بوضوح من مخطط التضمين في الشكل 3.4، عندما يكون النجم صغيرًا بحيث يصل محيطه إلى المحيط الحرج، يصبح انحناء المكان قويًا ولكنه ليس لا نهائيًا، وبالتأكيد لا يحدث اعوجاج حول النجم. ربما كان إدينجتون يعرف ذلك، لكن وصفه قدّم قصة جيدة، وقد استحوذ بطريقة غريبة على روح انحناء زمكان شفارتزشيلد.

وفي ثلاثينيات القرن العشرين، كما سنرى في الفصل الرابع، بدأت الضغوط تتزايد من أجل أخذ الثقوب السوداء على محمل الجد. ومع تصاعد هذه الضغوط، بدأ إدينجتون وأينشتاين وآخرون من بين «صانعي الرأي» في التعبير عن معارضة عنيفة لهذه الأشياء الوقحة. في عام 1939، نشر أينشتاين حسابات النسبية العامة التي فسر بها كدليل على سبب عدم وجود الثقوب السوداء. وقد حللت حساباته سلوك نوع مثالي من الأجسام التي ربما يعتقد المرء بإمكانية استخدامها لصنع ثقب أسود. كان الجسم عبارة عن مجموعة من الجسيمات التي تسحب بعضها بعضاً بفعل الجاذبية، وبالتالي تربط المجموعة بعضها ببعض، بنفس الطريقة التي تحكم الشمس بها النظام الشمسي معاً عن طريق جذب كواكبها. تحركت جميع الجسيمات الموجودة في عنقود أينشتاين في مدارات دائرية حول مركز مشترك؛ شكلت مداراتها كرة حيث تسحب الجسيمات الموجودة على أحد جانبي الكرة بقوة الجاذبية تلك الموجودة على الجانب الآخر (النصف الأيسر من الشكل 3.5).

EINSTEIN'S CLUSTER of PARTICLES

SCHWARZSCHILD'S STAR with CONSTANT DENSITY



3.5 دليل أينشتاين على أنه لا يمكن لأي جسم أن يصبح صغيراً إلى أن يصل إلى محيطه الحرج. على اليسار: إذا كان تجمع جسيمات أينشتاين الكروي أصغر من 1.5 من قيمة المحيط الحرج، فإن سرعة الجسيمات يجب أن تتجاوز سرعة الضوء، وهو أمر مستحيل. على اليمين: إذا كان النجم ذو الكثافة الثابتة أصغر من $8/9 = 1.125$ من قيمة المحيط الحرج، يجب أن يكون الضغط في مركز النجم لانهائياً، وهو أمر مستحيل

تخيل أينشتاين أنه يجعل هذا العنقود أصغر فأصغر، محاولاً دفع محيطه الفعلي نحو المحيط الحرج. وكما قد يتوقع المرء، أظهرت حساباته أنه كلما كان العنقود أكثر إحكاماً، زادت قوة الجاذبية على سطحه الكروي وزادت سرعة تحرك الجزيئات على سطحه لمنع نفسها من الانجذاب نحو الداخل. إذا كان العنقود أصغر من 1.5 مرة من محيطه الحرج - كما تظهر حسابات أينشتاين - ستصبح جاذبيته قوية جداً بحيث يتعين على الجسيمات أن تتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء لتجنب الانجذاب إليها. وبما أن لا شيء يمكنه أن يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء، فلا طريقة يمكن من خلالها أن يتحرك عنقود أصغر من 1.5 مرة من المحيط الحرج على الإطلاق. كتب أينشتاين: «النتيجة الأساسية لهذا التحقيق هي الفهم الواضح لسبب عدم وجود «مفردات سفارتسشيلد» في واقع الفيزياء».

وكعدم لوجهة نظره، يمكن لأينشتاين أيضاً أن يلجأ إلى البنية الداخلية لنجم مثالي مصنوع من مادة كثافتها ثابتة في كل أنحاء الجزء الداخلي للنجم (النصف الأيمن من الشكل 3.5). لقد مُنِعَ نجم كهذا من الانفجار الداخلي بسبب ضغط الغاز الموجود بداخله. استخدم كارل سفارتسشيلد النسبية العامة لاشتقاق وصف رياضي كامل لنجم كهذا، وأظهرت صيغته الرياضية أنه: إذا أصبح النجم مضغوطاً أكثر فأكثر، فلمواجهة القوة المتزايدة لجاذبيته الداخلية، يجب أن يرتفع الضغط الداخلي للنجم بشكل متزايد أكثر فأكثر. ومع اقتراب محيط النجم المنكمش من 1.125 مرة من محيطه الحرج، تظهر صيغ سفارتسشيلد الرياضية أن الضغط المركزي يصبح كبيراً إلى ما لا نهاية. نظراً لأن أي غاز حقيقي لا يمكنه أن ينتج ضغطاً لا نهائياً (ولا أي نوع آخر من المادة)، فإن نجم كهذا لا يمكن أن يصل إلى محيط مقداره 1.125 مرة من محيطه الحرج، وهكذا اعتقد أينشتاين.

لقد كانت حسابات أينشتاين صحيحة، لكنه فسر رسالتها بطريقة غير صحيحة. كانت الرسالة التي استخلصها هي أنه لا يمكن لأي جسم أن يصبح صغيراً إلى درجة المحيط الحرج، فسرهما أينشتاين هكذا بسبب معارضته البديهية لفكرة «مفردات سفارتسشيلد» (الثقوب السوداء) وليس بسبب الحسابات نفسها. أما الرسالة الصحيحة التي نعرفها الآن بأثر رجعي هي:

لا يمكن لعنقود الجسيمات الذي اقترحه أينشتاين وللنجم ذي الكثافة الثابتة أن يكونا مضغوطين إلى هذا الحد بحيث يشكلان ثقباً أسود، ذلك أن أينشتاين طالب بوجود نوع

من القوة داخلهما يوازن ضغط الجاذبية: قوة ضغط الغاز في حالة النجم، وقوة الطرد المركزي الناتجة عن حركات الجزيئات في حالة عنقود الجسيمات. في الواقع، صحيح أنه لا توجد قوة على الإطلاق يمكنها مقاومة ضغط الجاذبية عندما يكون الجسم قريباً جداً من المحيط الحرج. لكن هذا لا يعني بالضرورة أن الجسم لا يمكن أن يصبح صغيراً إلى هذا الحد. بل يعني أنه إذا أصبح الجسم صغيراً إلى هذا الحد، فإن الجاذبية تطفئ بالضرورة على جميع القوى الأخرى داخل الجسم، وتضغط على الجسم في انفجار داخلي كارثي، مما يشكّل ثقباً أسود. وبما أن حسابات أينشتاين لم تتضمن إمكانية الانفجار الداخلي (فقد استبعداها من جميع معادلاته)؛ لقد أضعاف هذه الرسالة.

إن اعتيادنا اليومي على فكرة الثقوب السوداء سيجعل من الصعب ألا نتساءل: «كيف يمكن لأينشتاين أن يكون غيبياً إلى هذا الحد؟ كيف يمكنه أن يتجاهل هذا الشيء، الانفجار الداخلي، الذي يصنع الثقوب السوداء؟». تُظهر ردة الفعل هذه جهلنا بعقلية الجميع تقريباً في عشرينيات وثلاثينيات القرن العشرين.

لم تكن تنبؤات النسبية العامة مفهومة تمامًا. لم يدرك أحد أن أي جسم مضغوط بما فيه الكفاية لا بد أن يتفجر إلى الداخل، وأن هذا الانفجار الداخلي سيؤدي إلى ثقب أسود. بدلاً من ذلك، تصور الجميع مفردات شفارتسكيلد (الثقوب السوداء) - بشكل غير صحيح - على أنها أجسام تحوم عند محيطها الحرج أو داخله مباشرة مدعومة ضد الجاذبية بنوع من القوة الداخلية، لذا اعتقد أينشتاين أن بإمكانه فضح الثقوب السوداء من خلال إظهار أنه لا يوجد شيء مدعوم بقوى داخلية يمكن أن يكون صغيراً إلى درجة أن يكون حجم المحيط الحرج.

لو شك أينشتاين في أن «مفردات شفارتسكيلد» يمكن أن توجد بالفعل، فربما كان قد أدرك أن الانفجار الداخلي هو المفتاح لتشكّلها وأن القوى الداخلية لا علاقة لها بالموضوع. لكنه كان على قناعة راسخة بأن هذه الأشياء لا يمكن أن توجد («لقد كانت رائحتها كريهة»؛ وهذا بدوره كان خطأ كبيراً) لدرجة أنه صنع حاجزاً عقلياً ضد الحقيقة لا يمكن اختراقه - وهكذا فعل جميع زملائه تقريباً.

في رواية T. H. White الملحمية «ملك الماضي والمستقبل» هناك مجتمع من النمل يحمل شعار: «كل ما ليس ممنوعاً، هو إجباري». وهذه ليست الطريقة التي تعمل بها

قوانين الفيزياء والكون الحقيقي. إن العديد من الأشياء التي تسمح بها قوانين الفيزياء ذات احتمالية حدوث ضعيفة إلى حد كبير، حتى إنها لا تحدث أبدًا في الممارسة العملية. أحد الأمثلة البسيطة والتي عفا عليها الزمن هو إعادة التجميع التلقائي لبيضة كاملة من شظايا متناثرة على الأرض: مثلًا كتجربة، التقط صورة متحركة لبيضة في أثناء سقوطها على الأرض وتناثرها إلى أجزاء هي ومادتها اللزجة. الآن شغل الصورة المتحركة للخلف، وشاهد البيضة تجدد نفسها تلقائيًا وتطير في الهواء. تسمح قوانين الفيزياء بمثل هذا التجديد مع مرور الزمن، لكن هذا لا يحدث أبدًا في الممارسة العملية لأن احتمالية حدوث هذا ضعيفة إلى حد كبير.

خلال عشرينيات وثلاثينيات القرن العشرين وحتى الأربعينيات والخمسينيات تناولت دراسات الفيزيائيين عن الثقوب السوداء مسألة ما إذا كانت قوانين الفيزياء تسمح بوجود مثل هذه الأجسام أم لا، وكانت الإجابة ملتبسة: للوهلة الأولى، تبدو الثقوب السوداء مسموحًا بها؛ ثم قدم أينشتاين وإدينجتون وآخرون حججًا (غير صحيحة) بأنها محرمة. في الخمسينيات من القرن الماضي، عندما دحضت هذه الحجج في نهاية المطاف، تحول العديد من علماء الفيزياء إلى القول بأن الثقوب السوداء قد تكون مسموحة بموجب قوانين الفيزياء، ولكن احتمالية حدوثها ضعيفة جدًا لدرجة أنها (مثل إعادة تجميع البيضة) لا تحدث أبدًا في الممارسة العملية.

في الواقع، الثقوب السوداء، على عكس البيضة المعاد تجميعها، ضرورية في بعض المواقف الشائعة، ولكن فقط في أواخر الستينيات، عندما أصبحت الأدلة إلزامية دامغة، بدأ معظم الفيزيائيين يأخذون الثقوب السوداء على محمل الجد. وسأصف في الفصول الثلاثة التالية كيف تصاعدت هذه الأدلة منذ الثلاثينيات وحتى الستينيات، والمقاومة التي واجهتها على نطاق واسع.

إن هذه المقاومة الواسعة والتي تكاد تكون عالمية في القرن العشرين للثقوب السوداء تتناقض بشكل ملحوظ مع الحماس الذي قوبلت به الثقوب السوداء في عصر جون ميشيل وبيير سيمون لابلاس في القرن الثامن عشر. وقد تكهن بأسباب هذا الاختلاف فيرنر إسرائيل، عالم الفيزياء المعاصر في جامعة ألبرتا والذي درس التاريخ بعمق.

كتب إسرائيل: «أنا متأكد من أن قبول الثقوب السوداء في القرن الثامن عشر لم يكن

مجرد أحد أعراض الحماسة الثورية في تسعينيات القرن الثامن عشر». يجب أن يكون التفسير، هو أن نجوم لابلاس المظلمة [الثقوب السوداء] لم تشكّل أي تهديد لإيماننا العزيز بديمومة المادة واستقرارها. وعلى النقيض من ذلك، تشكّل الثقوب السوداء في القرن العشرين تهديدًا كبيرًا لهذا الإيمان.

لقد تصور كل من ميشيل ولا بلاس أن نجومهما المظلمة مكونة من مادة لها نفس كثافة الماء أو الأرض أو الصخور أو الشمس، أي نحو 1 جرام لكل سنتيمتر مكعب. بهذه الكثافة، كي يكون النجم مظلمًا (أي أن يحتويه محيطه الحرج)، يجب أن تكون كتلته أكبر من كتلة الشمس بنحو 140 مليون مرة وأن يكون محيطه أكبر بنحو 3 مرات من مدار الأرض.

قد تكون مثل هذه النجوم، التي تحكمها قوانين نيوتن الفيزيائية غريبة، لكنها بالتأكيد لا تشكّل تهديدًا لأي معتقدات عزيزة حول الطبيعة. وإذا أراد المرء أن يرى النجم، فما عليه إلا أن يهبط على كوكب قريب منه وينظر إلى كرياتة الضوئية وهي ترتفع في مداراتها، قبل أن تسقط عائدة إلى سطح النجم. إذا أراد المرء عينه من المادة التي صُنِع منها النجم، فما عليه سوى الطيران إلى سطح النجم وجمع بعض منها وإعادتها إلى الأرض للفحص في المختبرات. لا أعرف ما إذا كان ميشيل أو لابلاس أو غيرهما من هذا العصر قد تكهنوا بمثل هذه الأشياء، لكن من الواضح أنهم إذا فعلوا ذلك، فليس ثمة سبب للقلق على قوانين الطبيعة، أو على ديمومة المادة واستقرارها.

يمثل المحيط الحرج (الأفق) للثقب الأسود في القرن العشرين تحديًا مختلفًا تمامًا. وعلى ارتفاع الأفق بالضبط لا يمكن للمرء أن يرى أي ضوء ناتج. أي شيء يسقط في الأفق لا يمكنه الإفلات لاحقًا؛ لقد ضاع من كوننا، وهذا الضياع يشكّل تحديًا خطيرًا لمفاهيم الفيزيائيين حول الحفاظ على الكتلة والطاقة.

يكتب إسرائيل: «هناك تشابه غريب بين تاريخ الثقوب السوداء والانجراف القاري [حركة الانجراف النسبية لقارات الأرض]». «لم يكن ممكنًا تجاهل الأدلة على وجود كلتا الظاهرتين بحلول عام 1916، لكن كلتا الفكرتين توقفتا في مسارهما لمدة نصف قرن بسبب المقاومة التي تكاد تكون لا عقلانية. أعتقد أن السبب النفسي الكامن وراء ذلك كان هو نفسه في كلتا الحالتين. ومن قبيل الصدفة الأخرى أن المقاومة لكلتيهما

بدأت في الانهيار عام 1960 تقريبًا. وبطبيعة الحال، استفاد كلا المجالين (الفيزياء الفلكية والجيوفيزياء) من التطورات التكنولوجية في فترة ما بعد الحرب. ولكن من المثير للاهتمام أن هذه اللحظة هي التي أطاحت فيها القنبلة الهيدروجينية السوفييتية وسبوتنيك بفكرة أن العلم الغربي محفور في الصخر ولا يمكن تحديه، وربما عززت الشكوك في أنه في السماء والأرض هناك أكثر مما كان العلم الغربي مستعدًا ليحلم به».

الفصل الرابع: لغز القزم الأبيض

وهو الفصل الذي فيه، إدينجتون وتشاندراسخار قد خاضا معركة حتى موت النجوم؛ النجوم هائلة الكتلة، ذلك أنه لا بد لها أن تنكمش حتى الموت، ومن موت النجوم تولد الثقوب السوداء، أم أن الميكانيكا الكمومية سوف تنجوها؟

الزمن: العام 1928؛

المكان: جنوب شرق الهند، مدينة مدراس على خليج البنغال.

هناك، في كلية بريزيدنسي (كلية الرئاسة)، كان صبي هندي يبلغ من العمر سبعة عشر عامًا يُدعى سابرامانين تشاندراسخار منغمسًا في دراسة الفيزياء والكيمياء والرياضيات. كان تشاندراسخار طويل القامة ووسيمًا، وله طلة جليلة وفخور بإنجازاته الأكاديمية. قرأ مؤخرًا كتاب أرنولد سومرفيلد الكلاسيكي بعنوان «البنية الذرية والخطوط الطيفية»، إنه يشعر الآن بسعادة غامرة لأن سومرفيلد -أحد أعظم علماء الفيزياء النظرية في العالم- قد جاء من منزله في ميونيخ لزيارة مدراس.

حرصًا على التواصل الشخصي، ذهب تشاندراسخار إلى غرفة سومرفيلد في الفندق وطلب إجراء مقابلة. وقد أعطاه سومرفيلد موعدًا بعد عدة أيام من ذلك الوقت.

في اليوم الموعد، توجه تشاندراسخار، مليئًا بالفخر والثقة بإتقانه للفيزياء الحديثة، إلى غرفة فندق سومرفيلد وطرق الباب. استقبله سومرفيلد بأدب، وسأله عن دراسته، ثم أحبطه قليلًا: «إن الفيزياء التي درستها أصبحت من الماضي». وأوضح أن الفيزياء تغيرت بالكامل خلال السنوات الخمس التي تلت كتابة ذلك المرجع. ومضى يصف الثورة في فهم الفيزيائيين للقوانين التي تحكم العالم الضئيل: عالم الذرات والجزيئات والإلكترونات والبروتونات. وفي هذا المجال، تبين أن قوانين نيوتن فشلت بأساليب لم توقعها النسبية. وكان استبدالها بمجموعة جديدة جذريًا من القوانين الفيزيائية، وهي

قوانين سُميت بالميكانيكا الكمومية لأنها تتعامل مع سلوك («ميكانيكا») جسيمات المادة («الكلمات»). على الرغم من أن عمرها عامان فقط، فإن قوانين الميكانيكا الكمومية الجديدة قد حققت بالفعل نجاحًا كبيرًا في تفسير سلوك الذرات والجزيئات.

كان تشاندراسخار قد قرأ في كتاب سومرفيلد عن النسخة الأولية الأولى من القوانين الجديدة. لكن القوانين الكمومية المؤقتة لم تكن مُرضية، كما أوضح له سومرفيلد. وعلى الرغم من اتفاقها بشكل جيد مع التجارب التي أُجريت على الذرات والجزيئات البسيطة مثل الهيدروجين، فإن القوانين المؤقتة لم تتمكن من تفسير سلوك الذرات والجزيئات الأكثر تعقيدًا، كما أنها لم تتشابه منطقيًا بطريقة متسقة بعضها مع بعض أو مع قوانين الفيزياء الأخرى. ولم تكن أكثر من مجرد مزج بين قواعد الحساب غير الجمالية والمرجلة.

لقد بدت النسخة الجديدة من القوانين -رغم ثورية صيغتها الرياضية- واعدة إلى حد كبير. لقد فسرت الذرات المعقدة والجزيئات المعقدة، وبدا أنها تنسجم بشكل جيد مع بقية الفيزياء.

استمع تشاندراسخار إلى التفاصيل، وقد بدا منبهراً.

الميكانيكا الكمومية وأمعاء الأقزام البيضاء

عندما افترقا، أعطى سومرفيلد تشاندراسخار الأدلة الفنية لمقال علمي كان قد كتبه للتو. لقد احتوى على اشتقاقات لقوانين الميكانيكا الكمومية التي تحكم مجموعات كبيرة من الإلكترونات المضغوطة معًا في أحجام صغيرة، على سبيل المثال في المعدن.

قرأ تشاندراسخار استعراض سومرفيلد للبراهين بافتتان ففهمها، ثم أمضى أيامًا عديدة في مكتبة الجامعة يدرس كل ما وصلت إليه يده من المقالات البحثية التي تتعلق بها. كان من المثير للاهتمام بشكل خاص مقال بعنوان «عن المادة الكثيفة» بقلم الفيزيائي الإنجليزي رالف هاورد فاوُلر، نُشر في عدد 10 ديسمبر 1926 من إشعارات المجلة الشهرية للجمعية الفلكية الملكية. أشار مقال فاوُلر إلى كتاب رائع بعنوان «البنية الداخلية للنجوم» من تأليف عالم الفيزياء الفلكية البريطاني البارز آرثر س. إدينجتون، والذي وجد فيه تشاندراسخار وصفًا غامضًا يكتنف النجوم البيضاء القزمة.

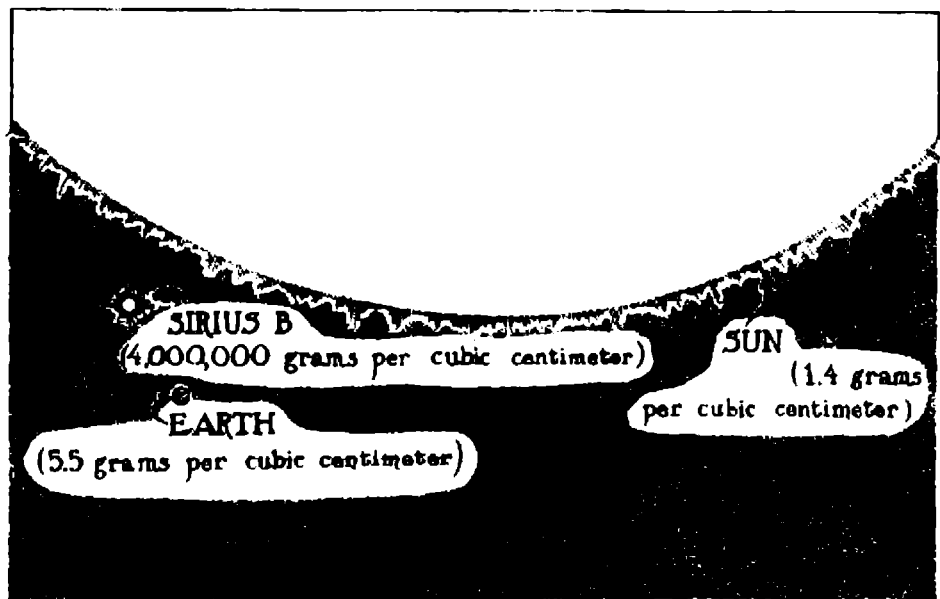
كانت الأقزام البيضاء نوعاً من النجوم التي اكتشفها علماء الفلك بواسطة تلسكوباتهم. الشيء الغامض في الأقزام البيضاء هو الكثافة العالية جداً للمادة الموجودة بداخلها، وهي كثافة أكبر بكثير مما واجهها البشر من قبل. لم يكن لدى تشاندراسخار أي وسيلة لمعرفة ذلك عندما فتح كتاب إدينجتون، لكن النضال من أجل كشف لغز هذه الكثافة العالية سيجبره هو وإدينجتون في النهاية على مواجهة احتمال أن النجوم الضخمة - حينما تموت - قد تنكمش لتشكّل ثقوباً سوداء.

«إن احتمالية وجود الأقزام البيضاء عالية جداً»، هكذا قرأ تشاندراسخار في كتاب إدينجتون. «لقد رصدنا ثلاثة فقط بشكل مؤكد، ولكنها جميعاً على مسافة قصيرة من الشمس... وأشهر هذه النجوم هو رفيق [النجم العادي] الشعرى اليمانية»، والذي يحمل اسم الشعرى اليمانية ب. الشعرى اليمانية والشعرى اليمانية ب هما النجمان السادس والسابع في ترتيب القرب من الأرض، ويبعدان عنا 8.6 سنة ضوئية، والشعرى اليمانية هو ألمع نجم في سمائنا. يدور الشعرى اليمانية ب حول الشعرى اليمانية تماماً كما تدور الأرض حول الشمس، لكن الشعرى اليمانية ب يحتاج إلى 50 عاماً لتمام دورة كاملة، كالتي تدورها الأرض حول الشمس مرة واحدة فقط.

وصف إدينجتون كيف قدّر علماء الفلك، من بيانات الرصد التلسكوبية، كتلة الشعرى اليمانية ب ومحيطه. وكانت الكتلة تساوي 0.85 من كتلة شمس؛ ومحيطه 118000 كيلومتر. وهذا يعني أن متوسط كثافة الشعرى اليمانية ب نحو 61000 جرام لكل سنتيمتر مكعب؛ أي أكبر من كثافة الماء بـ 61000 مرة؛ أي ما مقداره نحو طن لكل بوصة مكعبة. كتب إدينجتون: «هذه الحجة معروفة منذ عدة سنوات». أعتقد أنه من المناسب عمومًا إضافة الاستنتاج «وهو أمر سخيف». لم يكن بمقدور معظم علماء الفلك أن يأخذوا على محمل الجد كثافة بهذا القدر تعد أكبر كثيرًا مما اكتُشف على الأرض - ولو أنهم عرفوا واقع الحقيقة، كما كشفت عنها المزيد من الأبحاث الحديثة! تقول البيانات الرصدية الفلكية أن كتلته تبلغ 1.05 قدر كتلة الشمس، ومحيطه 31000 كيلومتر؛ أي مقدار كثافته 4 ملايين جرام لكل سنتيمتر مكعب أو 60 طنًا لكل بوصة مكعبة، وهو ما كانوا سيعتبرونه أكثر سخافة؛ انظر الشكل 4.1.

مضى إدينجتون في وصف ملاحظة جديدة رئيسية عززت الاستنتاج «السخيف». إذا كان الشعرى اليمانية ب بالفعل أكثر كثافة بـ 61000 مرة من الماء، فوفقًا لقوانين أينشتاين

للجاذبية، فإن الضوء الخارج من مجال جاذبيته الشديد سوف ينزاح إلى اللون الأحمر بمقدار 6 أجزاء من 100000 - وهو انزياح أكبر 30 مرة من الضوء الذي تشعه الشمس، وبالتالي سهل قياسه. يبدو أن هذا التنبؤ بالانزياح نحو الأحمر قد اختبره وحققه عالم الفلك والتر سيدني آدمز في مرصد جبل ويلسون على قمة جبل أعلى مدينة باسادينا، كاليفورنيا؛ وذلك قبل طبع كتاب إدينجتون في عام 1925. «لقد ضرب البروفيسور آدمز عصفورين بحجر واحد». كتب إدينجتون: «لقد أجرى اختبارًا جديدًا للنظرية النسبية العامة لأينشتاين وأكد شكوكنا في أن المادة الأكثر كثافة بـ 2000 مرة من البلاتين ليست ممكنة فحسب، بل إنها موجودة بالفعل في الكون».



4.1 مقارنة بين أحجام ومتوسط كثافات الشمس والأرض والنجم القزم الأبيض الشعري اليمانية ب، باستخدام أحدث قيم الرصد.

وفي كتاب إدينجتون، وجد تشاندراسخار وصفًا للكيفية التي يتحكم بها (توازن الضغط الداخلي ضد الانضغاط تحت تأثير الجاذبية) في البنية الداخلية للنجم، مثل الشمس أو الشعري اليمانية ب. يمكن فهم توازن الانضغاط / الضغط هذا (على الرغم من أن هذه لم تكن طريقة إدينجتون) عن طريق قياس الضغط على اللون في يدك (النصف الأيسر من

الشكل 4.2): إن القوة الداخلية لديك التي تضغط تتوازن بدقة مع القوة الخارجية لضغط هواء البالون. - ضغط الهواء الناتج عن جزيئات الهواء داخل البالون التي تقصف جدار البالون المطاطي.



4.2 اليسار: التوازن بين ضغط يديك والضغط داخل البالون. على اليمين: التوازن المماثل بين الانضغاط تحت تأثير الجاذبية (الوزن) للغلاف الخارجي للمادة النجمية وضغط الكرة الداخلي للمادة النجمية.

بالنسبة إلى النجم (النصف الأيمن من الشكل 4.2)، فإن ما يمثل يديك اللتين تضغطان على البالون هو وزن الغلاف الخارجي للمادة النجمية، ونظير الهواء الموجود في البالون هو الكرة الكروية من المادة الموجودة داخل ذلك الغلاف. يمكن اختيار الحد الفاصل بين الغلاف الخارجي والكرة الداخلية في أي مكان يرغب فيه المرء، على عمق متر داخل النجم، وعمق كيلومتر، وعمق ألف كيلومتر. أينما يختار المرء الحدود، يجب أن يفي بشرط أن يكون وزن الغلاف الخارجي الذي يضغط على الكرة الداخلية («ضغط الجاذبية» للغلاف الخارجي) متوازنًا بدقة مع ضغط جزيئات الكرة الداخلية التي تقصف الغلاف الخارجي. هذا التوازن، المطبق في كل موقع داخل النجم، يحدد بنية النجم؛ أي أنه يحدد تفاصيل كيفية اختلاف ضغط النجم وجاذبيته وكثافته من سطح النجم إلى مركزه.

كما وصف كتاب إدينجتون أيضًا مفارقة محيرة فيما كان معروفًا آنذاك عن هياكل النجوم من نوع القزم الأبيض. اعتقد إدينجتون - بل اعتقد جميع علماء الفلك في عام 1925- أن ضغط مادة القزم الأبيض، مثل ذلك الموجود في بالونك، لا بد أن يكون ناجمًا

عن حرارته. الحرارة تجعل ذرات المادة تطير داخل النجم بسرعة عالية، وتقصّف بعضها بعضًا وتقصّف منطقة التداخل بين الغلاف الخارجي للنجم وكرته الداخلية. إذا أخذنا وجهة نظر «العيانية» (أي ما يُرى بالأجهزة البصرية البسيطة أو العين المجردة)، فسنجد أنها غير دقيقة إلى حد بعيد بحيث لا يمكننا اكتشاف الذرات الفردية، فكل ما يمكننا قياسه هو إجمالي قوة القصف لجميع الذرات التي ضربت -على سبيل المثال- ستيتمترًا مربعًا واحدًا من سطح التداخل هذا. هذه القوة الكلية هي ضغط النجم.

حين يبرد النجم عن طريق إصدار إشعاعات في الفضاء، فإن ذراته سوف تتطاير بشكل أبطأ، فينخفض ضغطها، وستنضغط الكرة الداخلية للنجم إلى حجم أصغر تحت تأثير وزن الغلاف الخارجي. ومع ذلك، فإن هذا الانضغاط على الكرة سيؤدي إلى تسخينها مرة أخرى، مما يزيد من ضغطها بحيث يمكنها من تحقيق توازن انضغاط/ضغط مرة أخرى، بحيث يكون النجم أصغر قليلًا عن ذي قبل. وهكذا، بينما تبرد الشعري اليمانية ب تدريجيًا عن طريق إشعاع الحرارة إلى الفضاء بين-النجمي، يجب أن ينكمش حجمها تدريجيًا.

إذن، كيف سينتهي هذا الانكماش التدريجي؟ ما المصير النهائي للشعري اليمانية ب؟ الإجابة الأوضح (ولكنها خاطئة) هي أن النجم سوف ينكمش حتى يصبح صغيرًا جدًا؛ أي يصبح ثقبًا أسود، وهو ما كان بمثابة لعنة بالنسبة إلى إدينجتون؛ لقد رفض حتى النظر في الأمر. وأكد أن الإجابة المعقولة الوحيدة هي أن النجم يجب أن يتحول في النهاية إلى البرودة ثم يدعم نفسه ليس عن طريق الضغط الحراري (أي الضغط الناجم عن الحرارة)، بل عن طريق النوع الآخر الوحيد من الضغط المعروف في عام 1925: الضغط الذي اكتشفه الإنسان في الأجسام الصلبة كالصخور، الذي هو ضغط ناتج عن التناثر بين الذرات المتجاورة. لكن مثل هذا «الضغط الصخري» يصبح ممكنًا فقط -كما اعتقد إدينجتون (بشكل غير صحيح)- إذا كانت مادة النجم لها كثافة تشبه كثافة الصخور، بضعة جرامات لكل سنتيمتر مكعب -أقل بـ 10000 مرة من الكثافة الحالية للشعري اليمانية ب.

أدى هذا المسار من الحجة إلى ما يُعرف بمفارقة إدينجتون. سيتعين على الشعري اليمانية ب القيام بجهد هائل ضد جاذبيتها الذاتية للتوسع في كثافة الصخور، وبالتالي القدرة على دعم نفسها عندما تصبح باردة، ولم يعرف الفيزيائيون أي مصدر طاقة داخل النجم مناسب لمثل هذا الجهد. «تخيل جسمًا يفقد حرارته باستمرار ولكن ليس لديه طاقة كافية ليفقدها فيبرد!». كتب إدينجتون: «إنها مشكلة غريبة ويمكن للمرء أن يقدم

العديد من الاقتراحات الخيالية حول ما سيحدث بالفعل. ونحن هنا سنتخلى عن الصعوبة باعتبارها ليست حاسمة بالضرورة».

لقد وجد تشاندراسخار حلاً لهذه المفارقة في عام 1925 في مقال رالف هاورد فاو لير عام 1926 بعنوان «عن المادة الكثيفة». كان الحل يكمن في فشل قوانين الفيزياء التي استخدمها إدينجتون. كان لا بد من استبدال هذه القوانين بالميكانيكا الكمومية الجديدة، والتي وصفت الضغط داخل الشعري اليمانية ب والأقزام البيضاء الأخرى، ليس بسبب الحرارة، بل بسبب إحدى ظواهر الميكانيكية الكمومية الجديدة: حركات انتكاس الإلكترونات، والتي تسمى انتكاس الإلكترون³.

إن ظاهرة انتكاس الإلكترون تشبه إلى حد ما رهاب الأماكن المغلقة لدى الإنسان. عندما يحدث انضغاط للمادة إلى كثافة أعلى بـ 10000 مرة من كثافة الصخور، تسحق سحب الإلكترونات المحيطة بكل نواة ذرية بمقدار 10000 مرة. وبالتالي يصبح كل إلكترون محصوراً في «خلية» أصغر حجماً بـ 10000 مرة من المساحة التي كان مسموحاً له بالتحرك فيها سابقاً. ومع توفر مساحة صغيرة جداً له، يبدأ الإلكترون، مثل الإنسان الذي يعاني من رهاب الأماكن المغلقة، في الاهتزاز بشكل لا يمكن السيطرة عليه. فهو يطير حول خليته الصغيرة بسرعة عالية، ويركل بقوة كبيرة الإلكترونات المجاورة في خلاياها. وهذه الحركة الانتكاسية - كما يسميها الفيزيائيون - لا يمكن إيقافها عن طريق تبريد المادة. لا شيء يمكنه أن يوقفها. فهي تُفرض على الإلكترون بموجب قوانين الميكانيكا الكمومية، حتى عندما تكون المادة عند درجة حرارة تساوي الصفر المطلق.

هذه الحركة الانتكاسية هي نتيجة لخاصية من سمات المادة التي لم ترد في خلد فيزيائيي نيوتن قط، وهي سمة تسمى ازدواجية الموجة/الجسيم: جميع أنواع الجسيمات - وفقاً للميكانيكا الكمومية - تتصرف أحياناً كالموجة، وجميع أنواع الموجات تتصرف أحياناً كالجسيم. وبالتالي، فإن الموجات والجسيمات هما في الواقع نفس الشيء، «شيء ما» يتصرف أحياناً كموجة وأحياناً كجسيم؛ انظر الإطار 4.1.

يمكن فهم انتكاس الإلكترون بسهولة من حيث ازدواجية الموجة/الجسيم. حينما تنضغط المادة إلى كثافات عالية، وتقتصر مساحة كل إلكترون داخل المادة على خلية صغيرة للغاية مضغوطة باتجاه خلايا الإلكترونات المجاورة، يبدأ الإلكترون في التصرف جزئياً مثل

الموجة. لا يمكن أن يكون الطول الموجي لموجة الإلكترون (المسافة بين قمتي موجة الإلكترون) أكبر من الطول الموجي لخلية الإلكترون، لأنه لو حدث ذلك الأمر، لامتدت الموجة إلى ما وراء الخلية. لقد أصبحت الجسيمات ذات الأطوال الموجية القصيرة جدًا للتو نشطة للغاية بالضرورة. (المثال الشائع هو الجسم المرتبط بالموجة الكهرومغناطيسية، الفوتون. يمتلك فوتون الأشعة السينية طولاً موجياً أقصر بكثير من طول موجة فوتون الضوء، ونتيجة لذلك، تصبح فوتونات الأشعة السينية أنشط كثيراً من فوتونات الضوء. إن طاقتها العالية تمكّن فوتونات الأشعة السينية من اختراق اللحم والعظام البشرية).

في حالة وجود إلكترون داخل مادة شديدة الكثافة، فإن الطول الموجي القصير للإلكترون والطاقة العالية المصاحبة يشيران إلى حركة سريعة، وهذا يعني أن الإلكترون يجب أن يطير داخل خليته، ويتصرف مثل مسخ غريب الأطوار ذي سرعة عالية: نصف جسم ونصف موجة. يقول الفيزيائيون إن الإلكترون «منكس»، ويطلقون على الضغط الناتج عن حركته غير المنتظمة عالية السرعة اسم «ضغط انتكاس الإلكترون». ولا سبيل للتخلص من ضغط الانتكاس هذا؛ إنه نتيجة حتمية لحصر الإلكترون في مثل هذه الخلية الصغيرة. بالإضافة إلى ذلك، كلما زادت كثافة المادة، كانت الخلية أصغر، وقصر الطول الموجي للإلكترون، وكلما زادت طاقة الإلكترون، زادت سرعة حركة الإلكترون، وبالتالي زاد ضغط انتكاسه. في المادة العادية ذات الكثافات العادية، يكون ضغط الانتكاس صغيراً جداً بحيث لا يمكن ملاحظته أبداً، ولكن في الكثافات الضخمة للأقزام البيضاء يكون ضغط الانتكاس هائلاً.

4.1 الإطار

تاريخ موجز لازدواجية الموجة / الجسم

في زمن إسحاق نيوتن (أواخر القرن السابع عشر)، كان الفيزيائيون يتصارعون حول مسألة ما إذا كان الضوء يتكون من جسيمات أم موجات. نيوتن، على الرغم من تحفظه بشأن هذه القضية، مال نحو الجسيمات وأطلق عليها اسم الكريات، في حين جادل كريستيان هوجنس باعتبارها الموجات. سادت وجهة نظر نيوتن حول الجسيمات حتى أوائل القرن التاسع عشر، عندما أدى اكتشاف أن الضوء يمكن أن يتداخل مع نفسه (الفصل العاشر) إلى تحول الفيزيائيين إلى وجهة نظر الموجية لهوجنس. في منتصف

القرن التاسع عشر، وضع جيمس كليرك ماكسويل وصف الموجة على أساس ثابت مع قوانينه الموحدة للكهرباء والمغناطيسية، واعتقد الفيزيائيون بعد ذلك أن المسألة قد انتهت أخيرًا. ومع ذلك، كان كل ذلك قبل الميكانيكا الكمومية.

في تسعينيات القرن التاسع عشر، لاحظ ماكس بلانك ملاحظات في شكل طيف الضوء المنبعث من الأجسام شديدة الحرارة، تشير إلى أن شيئًا ما قد يكون مفقودًا في فهم الفيزيائيين للضوء. أظهر أينشتاين في عام 1905 ما كان مفقودًا: يتصرف الضوء أحيانًا كموجة وأحيانًا كجسيم (يُسمى الآن الفوتون). وأوضح أينشتاين أنه يتصرف مثل الموجة عندما تتداخل مع نفسها، لكنه يتصرف مثل الجسيم في التأثير الكهروضوئي: عندما يسقط شعاع خافت من الضوء على قطعة معدنية، يقوم الشعاع بإخراج الإلكترونات من المعدن واحدة تلو الأخرى، تمامًا كما لو كانت جزيئات الضوء الفردية (الفوتونات الفردية) تضرب إلكترونات القطعة المعدنية، ثم تخرجها من سطح المعدن واحدًا تلو الآخر. ومن طاقات الإلكترونات، استنتج أينشتاين أن طاقة الفوتون تتناسب دائمًا عكسًا مع الطول الموجي للضوء. وبالتالي، فإن خصائص الفوتون وموجة الضوء متشابكتان؛ يرتبط الطول الموجي ارتباطًا وثيقًا بطاقة الفوتون. إن اكتشاف أينشتاين لازدواجية الموجة/الجسيم للضوء، وقوانين الميكانيكا الكمومية المؤقتة في الفيزياء التي بُنيت حول هذا الاكتشاف، كانت السبب في فوزه بجائزة نوبل عام 1922 عن أعماله لعام 1921.

على الرغم من أن أينشتاين صاغ النظرية النسبية العامة بمفرده تقريبًا، فإنه كان واحدًا فقط من بين كثيرين ممن ساهموا في قوانين الميكانيكا الكمومية -قوانين «مملكة الأقزام». عندما اكتشف أينشتاين ازدواجية الموجة/الجسيم للضوء، لم يدرك أن الإلكترون أو البروتون قد يتصرف أيضًا أحيانًا كجسيم وأحيانًا كموجة. لم يعرفها أحد حتى منتصف عشرينيات القرن العشرين عندما طرحها لفائس دي برولي باعتبارها تخمينًا، ثم استخدمها إرفين شرودنجر كأساس لمجموعة كاملة من قوانين الميكانيكا الكمومية، وهي القوانين التي يكون فيها الإلكترون بمثابة موجة من الاحتمالية. احتمالية ماذا؟ احتمالية موقع الجسيمات. إن قوانين الميكانيكا الكمومية «الجديدة» هذه (التي حققت نجاحًا هائلًا في شرح كيفية تصرف الإلكترونات والبروتونات والذرات والجزيئات) ليست من جوانب اهتمام هذا الكتاب. ومع ذلك، من وقت لآخر، ستكون بعض ميزاتها مهمة. السمة المهمة في هذا الفصل هي انتكاس الإلكترون.

عندما كتب إدينجتون كتابه، لم يكن تنبؤ انتكاس الإلكترون قد ظهر بعد، ولم يكن من الممكن حساب كيفية استجابة الصخور أو المواد الأخرى بشكل صحيح إذا ضغطت إلى كثافات عالية جدًا للشعري اليمانية ب. ومع ظهور قوانين انتكاس الإلكترون، أصبحت الحسابات الآن ممكنة، وقد ابتكرها وتصورها ونفذها رالف هاورد فاوولر في مقاله عام 1926.

وفقًا لحسابات فاوولر، نظرًا لأن الإلكترونات الموجودة في الشعري اليمانية ب وغيرها من النجوم القزمة البيضاء، قد ضغطت في مثل هذه الخلايا الصغيرة، وأصبح ضغط انتكاسها أكبر بكثير من ضغطها الحراري (الناجم عن الحرارة). وبناء على ذلك، عندما يبرد الشعري اليمانية ب، فإن ضغطه الحراري الضئيل سوف يختفي، ولكن ضغط انتكاسه الهائل سيبقى وسيستمر في دعمه ضد الجاذبية.

وهكذا، كان حل مفارقة إدينجتون للقرمز الأبيض ذا شقين: (1) الشعري اليمانية ب غير مدعوم ضد جاذبيته في المقام الأول عن طريق الضغط الحراري كما كان يعتقد الجميع قبل ظهور الميكانيكا الكمومية الجديدة، بل هو مدعوم في المقام الأول بضغط الانتكاس. (2) عندما يبرد الشعري اليمانية ب، فإنه لا يحتاج إلى إعادة التوسع في كثافته ليصل إلى كثافة الصخور من أجل دعم نفسه، ولكن سيستمر دعمه بشكل مُرضٍ تمامًا عن طريق ضغط الانتكاس عند كثافته الحالية البالغة 4 ملايين جرام لكل سنتيمتر مكعب. كان تشاندراسخار، وهو يقرأ هذه الأشياء ويدرس صيغها الرياضية في مكتبة مدراس، مفتونًا. كان هذا أول اتصال له بعلم الفلك الحديث، وكان يجد هنا -جنبًا إلى جنب- نتائج عميقة لثورتي الفيزياء في القرن العشرين: النسبية العامة لأينشتاين، بوجهات نظرها الجديدة حول المكان والزمن، والتي ظهرت في الانزياح الأحمر تحت تأثير الجاذبية للضوء من الشعري اليمانية ب؛ وكانت الميكانيكا الكمومية الجديدة، بازواج موجة/جسيم، مسؤولة عن الضغط الداخلي للشعري اليمانية ب. وكان علم الفلك هذا مجالًا خصبًا يمكن للشباب أن يترك بصمته فيه.

بينما واصل دراسته الجامعية في مدراس، استكشف تشاندراسخار بشكل أكبر تبعات الميكانيكا الكمومية على الكون الفلكي، حتى إنه كتب مقالًا صغيرًا عن أفكاره، وأرسله

بالبريد إلى إنجلترا إلى رالف هاورد فاوُلر -الذي لم يكن قد التقى به من قبل- ورتب فاوُلر لنشره.

أخيرًا، في عام 1930، عندما كان في التاسعة عشرة من عمره، أكمل تشاندراسخار المعادل الهندي لدرجة البكالوريوس الأمريكية، وفي الأسبوع الأخير من شهر يوليو، استقل سفينة بخارية متجهة إلى إنجلترا البعيدة. لقد قُبِلَ في الدراسات العليا في جامعة كامبريدج، موطن بطليّه، رالف هاورد فاوُلر وآرثر إدينجتون.

الكتلة القصوى

كانت تلك الأيام الثمانية عشر التي قضاها في البحر، من مدراس إلى ساوْثهامبتون، أول فرصة لتشاندراسخار منذ عدة أشهر للتفكير بهدوء في الفيزياء من دون تشتيت انتباهه بالدراسات والامتحانات الرسمية. كانت عزلة البحر محفزة للتفكير، وكانت أفكار تشاندراسخار خصبة. في الواقع، كانت خصبة جدًا لدرجة أنها ستساعده في الفوز بجائزة نوبل، فقط بعد مرور أربعة وخمسين عامًا، وبعد صراع كبير من أجل قبولها من قِبل المجتمع الفلكي العالمي.

على متن السفينة البخارية، سُمح لتشاندراسخار بأن يتذكر الأقسام البيضاء، ومفارقة إدينجتون، وحل فاوُلر للمفارقة. يكاد يكون من المؤكد أن حل فاوُلر كان صحيحًا؛ لم يكن هناك أي شيء آخر في الأفق. ومع ذلك، لم يتوصل فاوُلر إلى التفاصيل الكاملة للتوازن بين ضغط الانتكاس والجاذبية في نجم قزم أبيض، كما أنه لم يحسب البنية الداخلية الناتجة للنجم -الطريقة التي تتغير بها كثافته وضغطه وجاذبيته في الاتجاه من سطحه إلى مركزه. كان هذا تحدّيًا مثيرًا للاهتمام للمساعدة في التخلص من الملل في أثناء الرحلة الطويلة.

كأداة في تحديد بنية النجم، كان تشاندراسخار بحاجة إلى معرفة إجابة السؤال التالي: لنفترض أن مادة القزم الأبيض قد ضغطت كثافتها بالفعل (على سبيل المثال، كثافة مليون جرام لكل سنتيمتر مكعب). ضغط المادة (أي تقليل حجمها وزيادة كثافتها) بنسبة 1 بالمائة إضافية. وسوف تقاوم المادة ضد هذا الضغط الإضافي عن طريق رفع ضغطها. ما النسبة المئوية التي سيرتفع بها ضغطها؟ يستخدم الفيزيائيون اسم مؤشر اللابُدَالِيَّة

الحرارية للإشارة إلى النسبة المئوية للزيادة في الضغط الناتجة عن ضغط إضافي بنسبة 1 بالمائة. سأستخدم في هذا الكتاب الاسم المناسب للرسم التوضيحي مقاومة الانضغاط أو ببساطة المقاومة. (لا ينبغي الخلط بين «مقاومة الانضغاط» و«المقاومة الكهربائية»، لأنهما مفهومان مختلفان تمامًا).

توصل تشاندراسخار إلى مقاومة الانضغاط من خلال فحص تبعات زيادة نسبتهما 1 بالمائة في كثافة مادة القزم الأبيض خطوة بخطوة: الانخفاض الناتج في حجم خلية الإلكترون، والانخفاض في الطول الموجي للإلكترون، وزيادة طاقة الإلكترون وسرعته، وأخيرًا زيادة الضغط. وكانت النتيجة واضحة: زيادة بنسبة 1 بالمائة في الكثافة تنتج عنها زيادة في الضغط بنسبة $5/3$ بالمائة (1.667 بالمائة). وبالتالي، تصبح مقاومة مادة القزم الأبيض $5/3$.

قبل عدة عقود من رحلة تشاندراسخار، حسب علماء الفيزياء الفلكية تفاصيل توازن الجاذبية والضغط داخل أي نجم، والذي تتمتع مادته بمقاومة للانضغاط بشكل مستقل عن مقدار العمق داخل النجم؛ أي نجم يزيد ضغطه وكثافته تدريجيًا بالنسبة إلى بعضهما، وكلما اتجهنا بشكل أعمق وأعمق داخل النجم، مع كل زيادة بنسبة 1 بالمائة في الكثافة يزيد الضغط بنفس النسبة المئوية الثابتة للزيادة. وقد وردت تفاصيل الهياكل النجمية الناتجة في كتاب إدينجتون البنية الداخلية للنجوم، الذي أحضره تشاندراسخار على متن السفينة لأنه كان يعتز به كثيرًا. وهكذا، عندما اكتشف تشاندراسخار أن المادة في القزم الأبيض تقاوم الانضغاط بمقدار $5/3$ -بصرف النظر عن كثافتها- كان سعيدًا. يمكنه الآن الانتقال مباشرة إلى كتاب إدينجتون لاكتشاف البنية الداخلية للنجم: الأسلوب الذي تتغير به كثافته وضغطه من السطح إلى المركز.

ومن بين الأشياء التي اكتشفها تشاندراسخار، من خلال الجمع بين الصيغ الرياضية الموجودة في كتاب إدينجتون وصيغته الخاصة، هي الكثافة في مركز الشعري اليمانية ب، وهي 360 ألف جرام لكل سنتيمتر مكعب (6 أطنان لكل بوصة مكعبة)، وسرعة حركة انتكاس الإلكترونات هناك، وهي 57 بالمائة من سرعة الضوء.

كانت سرعة الإلكترون هذه كبيرة بشكل مثير للقلق. كان تشاندراسخار، مثل فاوولر من قبله، قد حسب مقاومة مادة القزم الأبيض باستخدام قوانين الميكانيكا الكمومية، لكنه

تجاهل تأثيرات النسبية. ومع ذلك، عندما يتحرك أي جسم بسرعة الضوء تقريباً، حتى لو كان جسيماً يخضع لقوانين الميكانيكا الكمومية، فإن تأثيرات النسبية الخاصة يجب أن تصبح مهمة. عند 57٪ من سرعة الضوء، قد لا تكون تأثيرات النسبية كبيرة جداً، لكن القزم الأبيض الأكثر ضخامة والذي يتمتع بجاذبية أقوى سيتطلب ضغطاً مركزياً أكبر للدعم الذاتي، وستكون السرعات العشوائية في المقابل أعلى بالنسبة إلى إلكتروناته. في مثل هذا القزم الأبيض، لا يمكن بالتأكيد تجاهل تأثيرات النسبية. لذا، عاد تشاندراسخار إلى نقطة البداية في تحليله، ألا وهي حساب مقاومة ضغط مادة القزم الأبيض، متعهداً بأخذ تأثيرات النسبية في الاعتبار هذه المرة.

إن إدراج النسبية في الحسابات الرياضية يتطلب الربط بين قوانين النسبية الخاصة وقوانين الميكانيكا الكمومية، وهي شبكة معقدة من القوانين الرياضية كانت العقول العظيمة فقط في الفيزياء النظرية تعمل على حلها في ذلك الوقت. بمفرده على متن السفينة البخارية وبالكاد تخرج في الجامعة، لم يتمكن تشاندراسخار من إنتاج تلك الشبكة الكاملة من القوانين. لكنه استطاع إنتاج ما يكفي للإشارة إلى التأثيرات الرئيسية لسرعات الإلكترون العالية.

تصر الميكانيكا الكمومية على أنه عند ضغط مادة كثيفة بالفعل قليلاً، ستصبح كل خلية يتحرك فيها إلكترون أصغر مما كانت عليه، ينبغي أن ينخفض الطول الموجي للإلكترون وبالتالي لابد أن تزيد طاقة حركة انتكاسه. ومع ذلك، أدرك تشاندراسخار أن طبيعة طاقة الإلكترون الإضافية مختلفة، اعتماداً على ما إذا كان الإلكترون يتحرك ببطء مقارنة بالضوء أو بسرعة قريبة من سرعة الضوء. إذا كانت حركة الإلكترون بطيئة، كما هي الحال في الحياة اليومية، فإن زيادة الطاقة تعني حركة أسرع؛ أي سرعة أعلى. إذا كان الإلكترون يتحرك بالفعل بسرعة قريبة من سرعة الضوء، فمن المستحيل أن ترتفع سرعته كثيراً (إذا حدث ذلك، فسوف يتجاوز الحد الأقصى للسرعة!)، وبالتالي فإن زيادة الطاقة تأخذ شكلاً مختلفاً، وهو شكل غير مألوف في الحياة اليومية: الطاقة الإضافية تذهب إلى القصور الذاتي؛ أي أنه يزيد من مقاومة الإلكترون للتسارع، مما يجعل الإلكترون يتصرف كما لو أنه أصبح أثقل قليلاً. هذان المصيران المختلفان للطاقة الإضافية (السرعة الإضافية ضد القصور الذاتي الإضافي) ينتجان زيادات مختلفة في ضغط الإلكترون، وبالتالي مقاومات مختلفة للضغط، استنتج تشاندراسخار: عند سرعات الإلكترون المنخفضة، تصبح

المقاومة 5/3 من التي حسبها من قبل؛ وعند السرعات العالية، تصبح المقاومة 4/3.

من خلال الجمع بين [4/3 من المقاومة التي حسبها للمادة المنتكسة نسبياً (أي المادة شديدة الكثافة لدرجة أن الإلكترونات المنتكسة تتحرك بسرعة الضوء تقريباً) مع الصيغ الرياضية الواردة في كتاب إدينجتون]، استنتج تشاندراسخار بعد ذلك خصائص الأقزام البيضاء عالية الكثافة والكتلة. كانت الإجابة مذهلة: المادة عالية الكثافة ستواجه صعوبة في دعم ذاتها ضد الجاذبية - وهي صعوبة كافية لأنه فقط إذا كانت كتلة النجم أقل من 1.4 من كتلة الشمس يمكن موازنة ضغط الجاذبية وهذا يعني أنه لا يمكن لأي قزم أبيض أن تتجاوز كتلته 1.4 من كتلة الشمس على الإطلاق!

ومع معرفته المحدودة بالفيزياء الفلكية، كان تشاندراسخار في حيرة شديدة بشأن معنى هذه النتيجة الغريبة. راجع تشاندراسخار حساباته مراراً وتكراراً، لكنه لم يجد أي خطأ. لذلك، في الأيام القليلة الأخيرة من رحلته، كتب مخطوطتين علميتين بغرض النشر. في أحدهما وصف استنتاجاته حول بنية الأقزام البيضاء منخفضة الكتلة ومنخفضة الكثافة مثل الشعري اليمانية ب. وفي الأخرى شرح - باختصار شديد - استنتاجه بأنه لا يمكن لأي قزم أبيض أن يكون أثقل من 1.4 من كتلة الشمس.

عندما وصل تشاندراسخار إلى كامبريدج، كان فاولر خارج البلاد. في سبتمبر، عندما عاد فاولر، ذهب تشاندراسخار بفارغ الصبر إلى مكتبه وأعطاه المخطوطتين. وافق فاولر على الأولى وأرسلها إلى المجلة الفلسفية للنشر، لكن الثانية، وهي عن الحد الأقصى لكتلة القزم الأبيض، حيرته. ولم يتمكن من فهم دليل تشاندراسخار على أنه لا يمكن لأي قزم أبيض أن يكون أثقل من 1.4 شمس، ولكنه كان حينها فيزيائياً وليس فلكياً، فطلب من زميله الفلكي الشهير إدوارد آرثر ميلن أن يلقي نظرة عليها. وعندما لم يتمكن ميلن من فهم الدليل أيضاً، رفض فاولر إرسالها للنشر.

انزعج تشاندراسخار. لقد مرت ثلاثة أشهر منذ وصوله إلى إنجلترا، وعكف فاولر على ورقته لمدة شهرين. لقد كان هذا وقتاً طويلاً جداً لانتظار الموافقة على النشر. لذا، انزعج تشاندراسخار، وتخلى عن محاولاته للنشر في بريطانيا وأرسل المخطوطة بالبريد إلى مجلة الفيزياء الفلكية في أمريكا.

وبعد بضعة أسابيع جاء الرد من رئيس التحرير في جامعة شيكاغو: لقد أرسلت

المخطوطة إلى الفيزيائي الأمريكي كارل إيكارت للتحكيم. ذكر تشاندراسخار في المخطوطة -من دون تفسير- نتيجة حساباته التي تجمع بين النسبية والميكانيكا الكمومية، أن مقاومة الضغط تكون $4/3$ عند كثافات عالية جدًا. وهذه المقاومة التي تبلغ $4/3$ ضرورية لوضع حد لمدى ثقل القزم الأبيض. إذا كانت المقاومة أكبر من $4/3$ ، يمكن أن تكون الأقزام البيضاء ثقيلة كما يحلو لها -وقد اعتقد إيكارت أنها يجب أن تكون أكبر. أطلق تشاندراسخار ردًا يحتوي على اشتقاق رياضي للمقاومة التي تبلغ $4/3$. أقر إيكارت، بعد قراءة التفاصيل، بأن تشاندراسخار كان محققًا ووافق على نشر ورقته البحثية. أخيرًا، بعد مرور عام كامل على كتابة تشاندراسخار لها، نُشرت ورقته البحثية⁴.

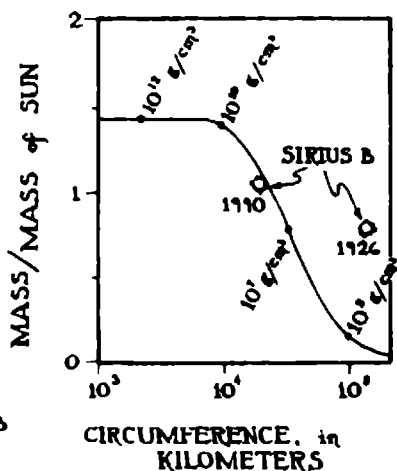
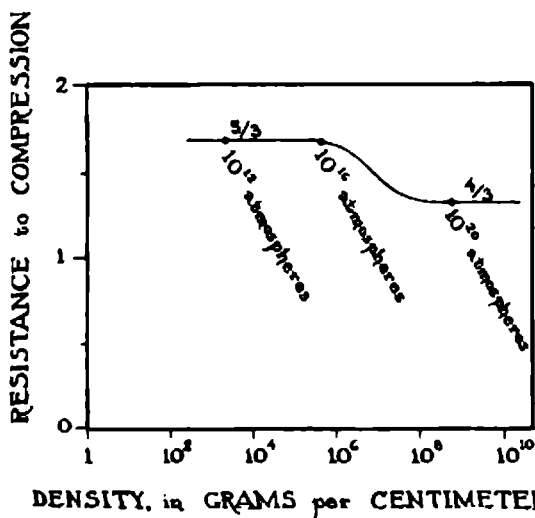
وكان رد المجتمع الفلكي هو الصمت المطبق. لا أحد يبدو مهتمًا، لذلك ولكي يكمل تشاندراسخار درجة الدكتوراه تحول إلى أبحاث أخرى أكثر قبولًا.

وبعد ثلاث سنوات، حصل على درجة الدكتوراه. وبعد الانتهاء، زار تشاندراسخار روسيا لتبادل الأفكار البحثية مع العلماء السوفييت. في لينينجراد، قال عالم الفيزياء الفلكية الأرمني الشاب، فيكتور أمازابوفيتش أمبارتسوميان لتشاندراسخار إن علماء الفلك في العالم لن يصدقوا الحد الأقصى الغريب الذي وضعه لكتل الأقزام البيضاء ما لم يحسبه باستخدام قوانين الفيزياء، «كتل لعينات» تمثل الأقزام البيضاء ثم إثبات بشكل واضح أنها جميعًا أقل من الحد الأقصى الذي اقترحه. أكد أمبارتسوميان أنه لم يكن كافيًا أن يحلل تشاندراسخار الأقزام البيضاء ذات الكثافات المنخفضة والمقاومات $5/3$ ، والأقزام البيضاء ذات الكثافات العالية للغاية والمقاومات $4/3$ ؛ كان بحاجة أيضًا إلى تحليل عينة جيدة من الأقزام البيضاء ذات الكثافة المتوسطة وإظهار أن كتلتها دائمًا أقل من 1.4 شمس. وبمجرد عودته إلى كامبريدج، قَبِل تشاندراسخار تحدي أمبارتسوميان. أحد الأسس التي سيحتاج إليها تشاندراسخار هو معادلة الحالة لمادة الأقزام البيضاء على نطاق كامل من الكثافات، بدءًا من الكثافات المنخفضة إلى الكثافات العالية للغاية. (يقصد الفيزيائيون بـ«حالة» المادة، كثافة المادة وضغطها -أو ما يعادل كثافتها ومقاومتها للانضغاط، حيث يمكن حساب الضغط باستخدام المقاومة والكثافة. ويقصد بـ«معادلة الحالة» العلاقة بين المقاومة والكثافة؛ أي المقاومة كدالة في الكثافة).

في أواخر عام 1934، عندما قَبِل تشاندراسخار تحدي أمبارتسوميان، أصبحت معادلة

حالة مادة القزم الأبيض معروفة، وذلك بفضل حسابات إدموند ستونر من جامعة ليدز في إنجلترا، وفيلهلم أندرسون من جامعة تارتو في إستونيا. أظهرت معادلة ستونر-أندرسون للحالة أنه مع انضغاط كثافة مادة القزم الأبيض أعلى فأعلى، تنتقل من النظام غير النسبي للكثافات المنخفضة وسرعات الإلكترون المنخفضة إلى المجال النسبي للكثافات الفائقة وسرعات الإلكترون تقترب من سرعة الضوء، فإن مقاومة المادة للانضغاط تتناقص بسلسلة من $5/3$ إلى $4/3$ (النصف الأيسر من الشكل 4.3). لم يكن بالإمكان أن تسلك المقاومة شكلاً أكثر بساطة.

ولمواجهة تحدي أبارتسوميان، كان على تشاندراسخار أن يجمع معادلة الحالة هذه (اعتماد المقاومة على الكثافة) مع قانون النجم للتوازن بين الجاذبية والضغط، وبالتالي الحصول على معادلة تفاضلية⁵ تصف البنية الداخلية للنجم - ما يعني وصف التغير في كثافته بالنسبة إلى البعد عن مركز النجم. ثم كان عليه أن يحل هذه المعادلة التفاضلية لعشرات النجوم أو نحو ذلك، والتي لها كثافات مركزية تتراوح بين المنخفض منها إلى المرتفع للغاية. فقط من خلال حل المعادلة التفاضلية لكل نجم يمكنه معرفة كتلة النجم ومعرفة ما إذا كانت أقل من 1.4 شمس.



4.3 على اليسار: معادلة ستونر-أندرسون لحالة المادة للقزم الأبيض؛ أي العلاقة بين كثافة المادة ومقاومتها للانضغاط. المرسوم أفقيًا هو الكثافة التي صُغِطت المادة بها. رُسمت مقاومتها عموديًا (النسبة المئوية للزيادة في الضغط المصاحبة لزيادة الكثافة بنسبة 1٪). على طول المنحنى يحدد

ضغط الانضغاط (الذي يساوي الضغط الداخلي)، بمضاعفات قيمة ضغط الغلاف الجوي للأرض. على اليمين: طول المحيط (مرسومة أفقيًا) وقيمة الكتل (مرسومة رأسيًا) للنجوم القزمة البيضاء كما حسبها تشاندراسخار باستخدام الآلة الحاسبة الميكانيكية (براونشفايجر Braunschweiger) الخاصة بإدينجتون. على طول المنحنى تتحدد كثافة المادة في مركز النجم، بالجرام لكل سنتيمتر مكعب.

بالنسبة إلى النجوم ذات الكثافة المركزية المنخفضة أو العالية للغاية، والتي درسها تشاندراسخار على الباخرة، فقد وجد حل المعادلة التفاضلية والهيكل النجمية الناتجة في كتاب إدينجتون، لكن بالنسبة إلى النجوم ذات الكثافات المتوسطة، لم يكن كتاب إدينجتون مفيدًا، وعلى الرغم من الجهد الكبير، لم يتمكن تشاندراسخار من استنتاج الحل باستخدام الصيغ الرياضية. وكانت الرياضيات معقدة للغاية. ولم يكن أمامه سوى حل معادلته التفاضلية رقميًا على الحاسوب.

الآن، كانت أجهزة الحاسوب في عام 1934 مختلفة تمامًا عن أجهزة الحاسوب في التسعينيات (أو التي نعرفها الآن). كانت أشبه بأبسط الآلات الحاسبة للجيب: يمكنها فقط مضاعفة رقمين في المرة الواحدة، وكان على المستخدم إدخال هذه الأرقام يدويًا، ثم إدارة ذراع الآلة. أطلقت هذه الذراع مجموعة معقدة من التروس والعجلات التي ستجري عملية الضرب ثم تعطي الناتج.

كانت أجهزة الحاسوب هذه عبارة عن آلات ثمينة؛ كان من الصعب جدًا الوصول إلى واحدة. لكن آرثر إدينجتون كان يمتلك واحدة، وهي «براونشفايجر» بحجم حاسوب شخصي مكتبي في أوائل التسعينيات، لذلك، ذهب تشاندراسخار -الذي أصبح الآن على علاقة جيدة بالرجل العظيم- إلى إدينجتون وطلب استعارتها. كان إدينجتون في ذلك الوقت متورطًا في جدل مع ميلن حول الأقزام البيضاء وكان حريصًا على رؤية التفاصيل الكاملة لبنية القزم الأبيض، لذلك سمح تشاندراسخار بنقل براونشفايجر إلى غرفته في كلية الثالوث حيث كان يعيش تشاندراسخار.

كانت الحسابات طويلة ومملة. كل مساء بعد العشاء، كان إدينجتون، الذي كان زميلًا في كلية الثالوث، يصعد الدرج إلى غرفة تشاندراسخار ليرى ما وصل إليه ويشجعه.

أخيرًا، بعد عدة أيام، انتهى تشاندراسخار. لقد واجه تحدي أمبارتسوميان. لكل واحد من النجوم العشرة الممثلة للأقزام البيضاء، حسب البنية الداخلية، ومن ثم الكتلة الإجمالية للنجم ومحيطه. وكانت جميع الكتل أقل من 1.4 قدرة كتلة الشمس، كما

كانت توقعاته الصارمة. بالإضافة إلى ذلك، عندما رسم كتل النجوم ومحيطاتها على رسم بياني و«ربط النقاط»، حصل على منحني واحد سلس (النصف الأيمن من الشكل 4.3؛ انظر أيضًا الإطار 4.2)، وكتل ومحيطات الشعري اليمانية ب التي قيست بالفعل والأقزام البيضاء الأخرى المعروفة وقد وافقت هذا المنحني بشكل جيد إلى حد ما. (مع تحسين الملاحظات الفلكية الحديثة، أصبح التوافق أفضل بكثير؛ لاحظ القيم الجديدة لعام 1990 لكتلة الشعري اليمانية ب ومحيطه في الشكل 4.3). فخورًا بنتائجه، توقع أن يتقبل علماء الفلك في العالم أخيرًا ادعائه بأنه لا يمكن للأقزام البيضاء أن تكون أثقل من 1.4 قدر كتلة الشمس، لقد كان تشاندراسخار سعيدًا جدًا.

وسيكون من دواعي سرورنا بشكل خاص أن نحظى بفرصة تقديم هذه النتائج إلى الجمعية الفلكية الملكية في لندن. كان من المقرر أن يقدم تشاندراسخار عرضًا تقديميًا يوم الجمعة، 11 يناير 1935. نص البروتوكول على إبقاء تفاصيل برنامج الاجتماع سرية حتى بدء الاجتماع، لكن الأنسة كاي ويليامز، السكرتيرة المساعدة للجمعية وصديقة تشاندراسخار، كانت لديها عادة إرسال البرامج له سرًا مقدمًا. وفي مساء يوم الخميس، عندما وصل البرنامج عبر البريد، فاجأه أن بعد حديثه مباشرة سيكون هناك حديث لإدينجتون حول موضوع «الانتكاس النسبي». كان تشاندراسخار منزعجًا بعض الشيء. خلال الأشهر القليلة الماضية، كان إدينجتون يأتي لرؤيته مرة واحدة على الأقل في الأسبوع بشأن عمله وكان يقرأ مسودات المقالات التي كان يكتبها، ولكن لم يذكر إدينجتون مطلقًا أنه قام بأي بحث خاص به حول نفس الموضوع!

4.2. الإطار

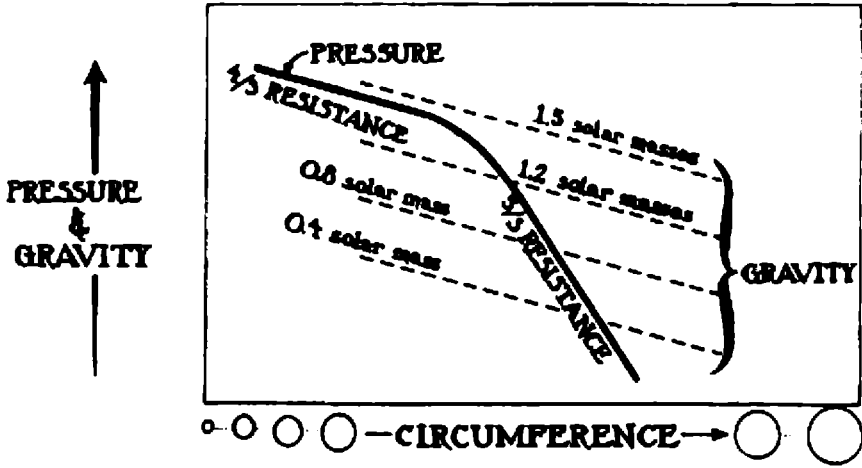
شرح لكتلة النجوم القزمة البيضاء ومحيطها

لفهم السبب نوعيًا وراء امتلاك الأقزام البيضاء الكتل والمحيطات الموضحة في الشكل 4.3، افحص الرسم أدناه. يُظهر متوسط الضغط والجاذبية داخل القزم الأبيض (المرسوم للأعلى) كدالة في محيط النجم (المرسوم لليمين) أو الكثافة (المرسومة في اليسار). إذا ضغط النجم، فستزداد كثافته وسيقل محيطه (حركة اليسار في الرسم)، وبالتالي فإن ضغط النجم سيرتفع على المنحني المرسوم بالخط الثخين، مع ارتفاع أكثر حدة عند الكثافات المنخفضة حيث تكون مقاومة الضغط $5/3$ ، ويكون الارتفاع أبطأ عند

الكثافات العالية حيث تكون $4/3$. يؤدي هذا الضغط نفسه للنجم إلى تحرك سطح النجم نحو مركزه، وبالتالي زيادة قوة الجاذبية الداخلية للنجم على المنحنى المرسوم بالخطوط المتقطعة. معدل زيادة الجاذبية مماثل لـ $4/3$ من المقاومة: هناك زيادة بنسبة $4/3$ في قوة الجاذبية لكل 1٪ من نسبة الضغط. يُظهر الرسم عدة خطوط متقطعة للجاذبية، واحد لكل قيمة من كتلة النجم، لأنه كلما زادت كتلة النجم زادت جاذبيته.

داخل كل نجم، على سبيل المثال (نجم كتلته 1.2 كتلة شمسية)، يجب أن توازن الجاذبية والضغط بعضهما. ولذلك، يجب أن يقع النجم عند تقاطع خط الجاذبية المتقطع الذي يحمل علامة «1.2 كتلة شمسية»، ومنحنى الضغط الثخين؛ يحدد هذا التقاطع محيط النجم (موضح في أسفل الرسم البياني). إذا كان المحيط أكبر، فإن خط الجاذبية المتقطع للنجم سيكون فوق منحنى الضغط الثخين، وسوف تطفى الجاذبية على الضغط، وسوف يتفجر النجم داخليًا. وإذا كان المحيط أصغر، فإن الضغط سيطفى على الجاذبية، وسوف يتفجر النجم خارجيًا.

تتوافق تقاطعات الخطوط المتقطعة المتعددة مع المنحنى الثخين مع كتل ومحيطات الأقزام البيضاء المتوازنة، كما هو موضح في النصف الأيمن من الشكل 4.3. بالنسبة إلى نجم ذي كتلة صغيرة (أدنى خط متقطع)، يكون محيط التقاطع كبيرًا. بالنسبة إلى النجم ذي الكتلة الأكبر (الخطوط المتقطعة الأعلى)، يكون محيطه أصغر. بالنسبة إلى نجم كتلته أكبر من 1.4 شمس، لا يوجد تقاطع على الإطلاق؛ يكون خط الجاذبية المتقطع دائمًا فوق منحنى الضغط الصلب، لذا تطفى الجاذبية دائمًا على الضغط، بصرف النظر عن محيط النجم، مما يجبر النجم على الانفجار داخليًا.

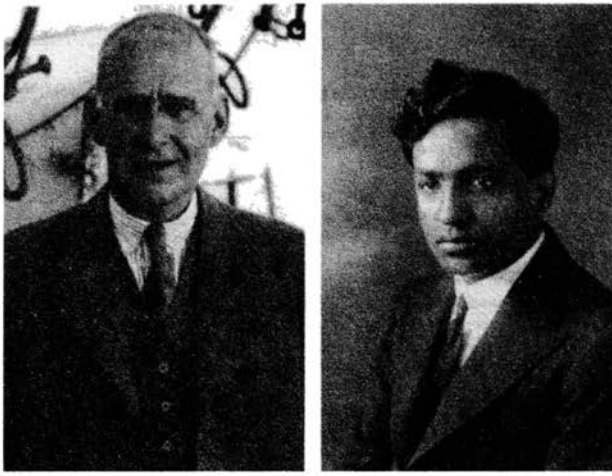


للتقليل من مشاعر الانزعاج، نزل تشاندراسخار لتناول العشاء. كان إدينجتون هناك، يتناول الطعام على طاولة عالية، لكن البروتوكول يملّي عليك أنه ليس لمجرد أنك تعرف رجلاً بارزاً جداً، ولمجرد أنه يعرب عن اهتمامه بعملك، أن تزعجه بشأن مسألة كهذه. فجلس تشاندراسخار في مكان آخر وأمسك بلسانه.

بعد العشاء، طلب إدينجتون بنفسه تشاندراسخار وقال: «لقد طلبت من سمارت أن أعطيك نصف ساعة غداً بدلاً من الخمس عشرة دقيقة المعتادة». شكره تشاندراسخار وانتظر منه أن يقول شيئاً عن الموضوع الذي سيتحدث عنه، لكن إدينجتون اعتذر وغادر. اكتسب انزعاج تشاندراسخار لوناً من قلق.

المعركة

في صباح اليوم التالي، استقل تشاندراسخار القطار إلى لندن وسيارة أجرة إلى بيرلينجتون هاوس، مقر الجمعية الفلكية الملكية. بينما كان هو وصديقه، بيل ماكربا، ينتظران بدء الاجتماع، وبينما إدينجتون يمشي وقد مر عليهما؛ سأله ماكربا -بعد أن قرأ البرنامج للتو: «حسنًا، يا أستاذ إدينجتون، ما الذي يجب أن نفهمه من «الانتكاس النسبي»؟»، ردًا على ذلك، التفت إدينجتون إلى تشاندراسخار وقال: «هذه مفاجأة لك»، وخرج، تاركًا تشاندراسخار أكثر قلقًا.



اليسار: آرثر ستانلي إدينجتون في عام 1932. اليمين: سابرامانين تشاندراسخار في عام 1934.
[على اليسار: مقدمة من UPI/Bettmann؛ على اليمين: إهداء من س. تشاندراسخار].

وأخيرًا بدأ الاجتماع. مر الوقت ورئيس الجمعية يصدر تنبيهات مختلفة، وألقى العديد من علماء الفلك خطابات متنوعة. وأخيرًا جاء دور تشاندراسخار. ولقمع قلقه، قدم عرضًا لا تشوبه شائبة، مؤكدًا بشكل خاص على الحد الأقصى للكتلة الذي اقترحه بالنسبة إلى الأقزام البيضاء.

وبعد تصفيق مهذب من زملاء الجمعية، دعا الرئيس إدينجتون للحديث.

بدأ إدينجتون بمراجعة تاريخ أبحاث الأقزام البيضاء بلطف، ثم استجمع قواه ووصف النتائج المزعجة لتنتيجة الكتلة القصوى لتشاندراسخار:

في مخطط تشاندراسخار لكتلة النجم المرسومة عموديًا ومحيطه أفقيًا (الشكل 4.4)، هناك مجموعة واحدة فقط من الكتل وأطوال المحيط التي يمكن موازنة الجاذبية فيها بالضغط غير الحراري (الضغط الذي يبقى بعد أن يصبح النجم باردًا): بالنسبة إلى الأقزام البيضاء الواقعة في المنطقة على يسار منحنى القزم الأبيض لتشاندراسخار (المنطقة المظللة؛ النجوم ذات المحيطات الأصغر)، فإن ضغط الانتكاس غير الحراري للنجم يطغى تمامًا على الجاذبية. سيؤدي ضغط الانتكاس إلى الانفجار الداخلي لأي نجم في المنطقة المظللة. في المنطقة الواقعة على يمين منحنى القزم الأبيض (المنطقة البيضاء؛ النجوم ذات أطوال المحيطات الأكبر)، تطغى الجاذبية تمامًا على ضغط انتكاس النجم. أي نجم

بارد يجد نفسه في هذه المنطقة سوف ينفجر داخليًا على الفور تحت ضغط الجاذبية.

لا يمكن للشمس أن تعيش في المنطقة البيضاء، إلا لأنها الآن شديدة الحرارة؛ يتمكن ضغطها الحراري (النجم عن الحرارة) من موازنة جاذبيتها. ومع ذلك، عندما تبرد الشمس في النهاية، سيختفي ضغطها الحراري ولن تكون قادرة على دعم ذاتها. ستجبرها الجاذبية على الانكماش أصغر فأصغر، وتنضغط إلكترونات الشمس إلى خلايا أصغر فأصغر، حتى تعترض في النهاية باستخدام ضغط انتكاس كافٍ (ضغط غير حراري) لوقف الانكماش. خلال هذا «الموت» الانكماش، ستبقى كتلة الشمس ثابتة تقريبًا، لكن محيطها سينخفض، لذا ستتحرك نحو اليسار على خط أفقي في الشكل 4.4، وتتوقف أخيرًا عند منحنى القزم الأبيض - والذي يعتبر قبرها. هناك، كقزم أبيض، ستستمر الشمس في البقاء إلى الأبد، وتبرد تدريجيًا وتصبح قزمًا أسود، وهو جسم بارد ومظلم وصلب بحجم الأرض تقريبًا ولكنه أثقل وأكثر كثافة بمليون مرة.

بدا هذا المصير النهائي للشمس مُرضيًا تمامًا لإدينجتون. ليس كذلك. فالمصير النهائي لنجم كتلته أكبر من حد تشاندراسخار الأقصى للقزم الأبيض والذي تبلغ كتلته 1.4 مرة من كتلة شمسية - على سبيل المثال الشعري اليمانية - رفيق الشعري اليمانية ب الذي تبلغ كتلته 2.3 مرة من كتلة شمسية. إذا كان تشاندراسخار على حق، فإن مثل هذا النجم لا يمكن أن يموت أبدًا بنفس طريقة الموت اللطيف الذي ينتظر الشمس. عندما يحمل الإشعاع الذي يشعه إلى الفضاء حرارة كافية سيبدأ النجم في البرودة، وسينخفض ضغطه الحراري، وسينكمش تحت ضغط الجاذبية أصغر فأصغر. بالنسبة إلى نجم ضخم مثل الشعري اليمانية، لا يمكن إيقاف الانكماش عن طريق ضغط الانتكاس غير الحراري. ويتضح هذا من الشكل 4.4، حيث لا تمتد المنطقة المظللة عاليًا بما يكفي لاعتراض مسار الشعري اليمانية المنكمش. وجد إدينجتون هذا التوقع مزعجًا.

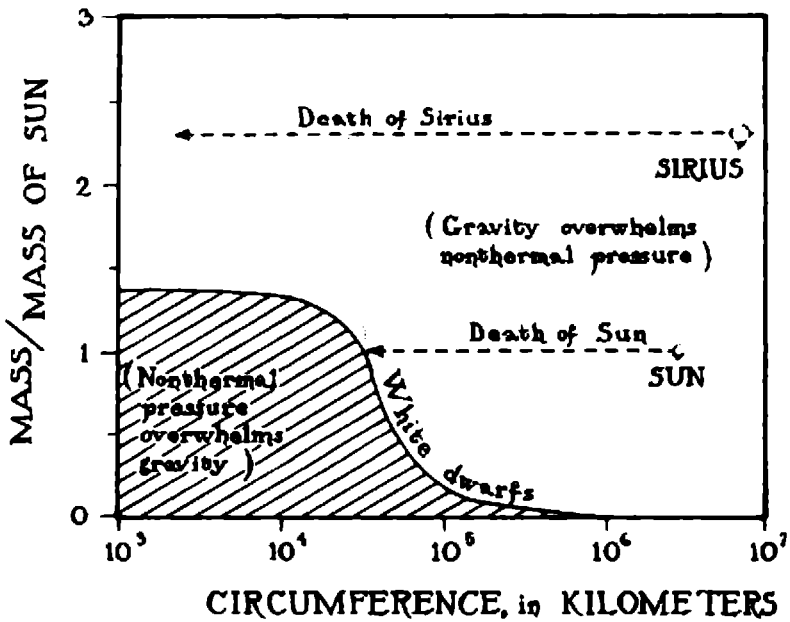
قال إدينجتون لجمهوره: «يجب على النجم أن يستمر في الإشعاع والمزيد من الإشعاع والانكماش والمزيد من الانكماش، حتى أفترض أنه يصل إلى نصف قطر يبلغ مقداره بضعة كيلومترات، عندما تصبح الجاذبية قوية بما يكفي للاحتفاظ بالإشعاع، ثم يختفي النجم ويمكن أخيرًا أن يجد السلام». (على حد تعبير التسعينيات، لا بد أن يشكّل ثقبًا أسود). «لقد حصل تشاندراسخار على هذه النتيجة من قبل، لكنه أكدها في بحثه الأخير؛ وعندما ناقشت الأمر معه، شعرت بأنني مدفوع إلى استنتاج مفاده أنه كان مدفوعًا

باختزال سخي للصيغة الرياضية للانتكاس النسبي. قد تتدخل حوادث مختلفة لإنقاذ النجم، لكنني أريد حماية أكبر من ذلك. أعتقد أنه يجب أن يكون هناك قانون طبيعي لمنع النجم من التصرف بهذه الطريقة السخيفة!.

ثم جادل إدينجتون بأن الإثبات الرياضي لتشاندراسخار على نتيجته لا يمكن الوثوق به، لأنه اعتمد على ترابط غير متطور بشكل كافٍ بين النسبية الخاصة والميكانيكا الكمومية. وقال إدينجتون: «أنا لا أعتبر أن نسل اتحاد كهذا قد وُلد في إطار زواج شرعي». «أشعر بالرضا عن نفسي لأنه [إذا ربطت الأمور بشكل صحيح]، فستعوض التصحيحات النسبية، بحيث نعود إلى الصيغة «العادية»»، (أي إلى المقاومة التي تبلغ قيمتها $3/5$ ، والتي ستسمح للأقزام البيضاء بأن تكون ضخمة بشكل لا مبرر له) وبالتالي سيتمكن الضغط من إيقاف انكماش الشعري اليمانية عند المنحنى ذي الخطوط المتقطعة الافتراضي في الشكل 4.4). بعد ذلك، رسم إدينجتون كيف يعتقد هو كيف يجب دمج النسبية الخاصة والميكانيكا الكمومية، وهو نوع مختلف من الشبكات التي استخدمها تشاندراسخار وستونر وأندرسون، وزعم إدينجتون أن الشبكة من شأنها أن تنقذ جميع النجوم من مصير الثقب الأسود.

لقد صُدم تشاندراسخار. لم يتوقع قط مثل هذا الهجوم على عمله. لماذا لم يناقش إدينجتون الأمر معه سابقاً؟ أما بالنسبة إلى حجة إدينجتون، فقد بدت لتشاندراسخار خادعة، وربما كانت خطأ كبيراً بالتأكيد.

في ذلك الحين، كان آرثر إدينجتون الرجل العظيم في علم الفلك البريطاني. كانت اكتشافاته أسطورية تقريباً. لقد كان مسؤولاً إلى حد كبير عن فهم علماء الفلك للنجوم العادية مثل الشمس والشعري اليمانية، وتصميماتها الداخلية، وأغلفتها الجوية، والضوء الذي ينبعث منها، لذلك بطبيعة الحال استمع له زملاء الجمعية وعلماء الفلك في جميع أنحاء العالم باحترام كبير. من الواضح أنه إذا كان إدينجتون يعتقد أن تحليل تشاندراسخار غير صحيح، فمن المؤكد أنه غير صحيح.



4.4 عندما يبدأ نجم عادي مثل الشمس أو الشعرى اليمانية (وليس الشعرى اليمانية ب) في البرودة، فإنه يجب أن ينكمش، ويتحرك نحو اليسار في هذا الرسم البياني للكتلة مقابل المحيط. وستتوقف انكماش الشمس عندما تصل إلى حافة المنطقة المظلمة (منحنى القزم الأبيض). هناك يوازن ضغط الانتكاس ضغط الجاذبية. وعلى النقيض من ذلك، لا يمكن إيقاف انكماش الشعرى اليمانية لأنه لا يصل أبدًا إلى حافة المنطقة المظلمة. انظر الإطار 4.2 للحصول على وصف مختلف لهذه الاستنتاجات. إذا كانت مقاومة مادة القزم الأبيض للانضغاط، كما ادعى إدينجتون، دائمًا $5/3$ ؛ أي إذا لم تخفضها النسبية إلى $4/3$ في الكثافات العالية، فإن الرسم البياني للكتلة مقابل المحيط سيكون له شكل المنحنى المتقطع الباهت، وسوف يتوقف انكماش الشعرى اليمانية عند هذا الحد.

بعد الاجتماع، جاء الزملاء الواحد تلو الآخر إلى تشاندراسخار لتقديم التعازي. قال له ميلن: «أشعر في أعماقي أن إدينجتون على حق».

في اليوم التالي، بدأ تشاندراسخار في مناشدة أصدقائه الفيزيائيين طلبًا للمساعدة. وكتب إلى ليون روزنفيلد في «كوبنهاجن»: «إذا كان إدينجتون على حق، فسألقي عملي في الأشهر الأربعة الأخيرة كله في المدفأة. هل يمكن أن يكون إدينجتون محققًا أو بد بشدة أن أعرف رأي بور». (كان نيلز بور أحد آباء الميكانيكا الكمومية وأكثر الفيزيائيين احترامًا في ثلاثينيات القرن العشرين). ورد روزنفيلد بعد يومين، مؤكدًا أنه وبور كليهما

مقتنعان بأن إدينجتون مخطئاً وأن تشاندراسخار هو المحق. كتب: «قد أقول إن رسالتك كانت مفاجأة نوعاً ما بالنسبة إليّ، لأنه لم يحلم أحد قط بالتشكيك في المعادلات [التي استخدمتها لاشتقاق 4/3 من المقاومة] وملاحظة إدينجتون كما وردت في رسالتك غامضة تماماً. لذا أعتقد أنه من الأفضل أن تبتهج وألاً تستسلم للخوف من [كذا] رؤساء الكهنة». وفي رسالة تالية في نفس اليوم، كتب روزنفيلد: «أنا وبور غير قادرين على رؤية أي معنى في تصريحات إدينجتون على الإطلاق».

لكن بالنسبة إلى علماء الفلك، لم يكن الأمر واضحاً في البداية. لم تكن لديهم خبرة في قضايا الميكانيكا الكمومية والنسبية، لذلك سيطرت سلطة إدينجتون عليهم لعدة سنوات. بالإضافة إلى ذلك، ظل إدينجتون متمسكاً بموقفه. لقد أعمته معارضته للثقوب السوداء لدرجة أن حكمه كان مشوشاً تماماً. لقد أراد بشدة أن يكون هناك «قانون طبيعي لمنع النجم من التصرف بهذه الطريقة السخيفة»، لدرجة أنه استمر في الاعتقاد ببقية حياته بوجود مثل هذا القانون -في حين أن هذا القانون غير موجود في الواقع.

بحلول أواخر ثلاثينيات القرن العشرين، فهم علماء الفلك، بعد أن تحدثوا إلى زملائهم الفيزيائيين، خطأ إدينجتون، لكن احترامهم لإنجازاته السابقة الهائلة منعهم من قول ذلك علناً. وفي محاضرة ألقاها في مؤتمر علم الفلك في باريس عام 1939، هاجم إدينجتون مرة أخرى استنتاجات تشاندراسخار. عندما هاجم إدينجتون، مرر تشاندراسخار ورقة صغيرة إلى هنري نوريس راسل (عالم فلك مشهور من جامعة برينستون في أمريكا) والذي كان يترأس الاجتماع. كتب تشاندراسخار على الورقة إذنًا بالرد. أعاد راسل الورقة وقد كتب عليها بنفسه يقول فيها: «أُفْضِلُ ألا تفعل ذلك»، على الرغم من أن راسل كان قد قال لتشاندراسخار على انفراد في وقت سابق من اليوم: «نحن لم نعد نؤمن بإدينجتون».

ومع قبول كبار علماء الفلك في العالم أخيراً -على الأقل من دون علم إدينجتون- بالكتلة القصوى لتشاندراسخار بالنسبة إلى الأقزام البيضاء؛ هل كانوا مستعدين بعد ذلك للاعتراف بإمكانية وجود ثقوب سوداء في الكون الحقيقي؟ مُطْلَقاً. إذا لم تقدم الطبيعة قانوناً ضدها من النوع الذي سعى إليه إدينجتون، فمن المؤكد أن الطبيعة ستجد طريقاً آخر للتهرب: من المفترض أن كل نجم ضخم سيقذف ما يكفي من المادة إلى الفضاء بين-النجمي، مع تقدمه في السن أو في أثناء سكرات موته لتقليل كتلته إلى أقل من 1.4 قدر كتلة الشمس، وبالتالي سيدخل إلى قبره كقزم أبيض آمن. كانت هذه هي وجهة النظر

التي تحول إليها معظم علماء الفلك عندما خسر إدينجتون معركته، والتزموا بها خلال الأربعينيات والخمسينيات، وحتى أوائل الستينيات.

أما تشاندراسخار فقد تضررت سمعته بسبب الجدل مع إدينجتون. وكما يتذكر بعد نحو أربعين عامًا: «شعرت أن علماء الفلك من دون استثناء اعتقدوا أنني كنت مخطئًا. لقد اعتبروني دون كيشوت نوعًا ما الذي يحاول قتل إدينجتون. كما يمكنك أن تتخيل، كانت تجربة محبطة جدًا لي، أن أجد نفسي في جدل مع شخصية بارزة في علم الفلك وأن يفقد عملي مصداقيته تمامًا وكليًا من قبل المجتمع الفلكي. كان عليّ أن أقرر ما يجب أن أفعله. هل يجب أن أواصل القتال بقية حياتي؟ بعد كل شيء، كنت في منتصف العشرينيات من عمري في ذلك الوقت. لقد توقعت بنفسني نحو ثلاثين إلى أربعين عامًا من العمل العلمي، ولم أعتقد ببساطة أنه من المفيد أن أترك نهائيًا شيئًا أنجزته بالفعل. لقد كان من الأفضل لي أن أغير مجال اهتمامي وأتوجه إلى شيء آخر».

لذلك في عام 1939 أدار تشاندراسخار ظهره للأقزام البيضاء وموت النجوم، ولم يعد إليها لمدة ربع قرن (الفصل 7).

وماذا عن إدينجتون؟ لماذا عامل تشاندراسخار بشكل سيئ للغاية؟ بالنسبة إلى إدينجتون، ربما لم تكن المعاملة سيئة على الإطلاق. كان الصراع الفكري الخشن المتعثر أسلوب حياة بالنسبة إليه. قد تكون معاملة الشاب تشاندراسخار بهذه الطريقة، إلى حد ما، قدرًا من الاحترام، وعلامة على أنه كان يقبل تشاندراسخار كعضو في المؤسسة الفلكية. في الواقع، منذ أول مواجهة بينهما في عام 1935 حتى وفاة إدينجتون في عام 1944، أظهر إدينجتون عاطفة شخصية دافئة تجاه تشاندراسخار، ورد تشاندراسخار بالمثل، على الرغم من احتراقه (تلطيخ سمعته) بسبب الجدل.

مكتبة

t.me/soramnqraa

1. للحصول على مناقشة واضحة لقوانين الميكانيكا الكمومية، انظر الشفرة الكونية بقلم هاينز باجلز (سايمون وشوستر، 1982).
2. من السهل جدًا، وقياس دقيق، الحصول على النتيجة التي يعتقد المرء أنه من المفترض أن يحصل عليها. ومن الأمثلة على ذلك قياس آدامز للانزياح الأحمر تحت تأثير الجاذبية. وقد اتفقت نتيجته مع التوقعات، ولكن التنبؤات كانت خاطئة بشدة (خمس مرات أقل من اللازم) بسبب أخطاء في تقديرات الفلكيين لكتلة الشعري اليمانية ب ومحيطه.
3. هذا الاستخدام لكلمة «انتكاس» ليس له أصل في مفهوم «الانتكاس الأخلاقي» (أدنى مستوى ممكن من الأخلاق)، بل في مفهوم وصول الإلكترونات إلى أدنى مستوياتها الممكنة من الطاقة.
4. في هذه الأثناء، استنتج إدmond ستونر ونشر بشكل مستقل وجود الكتلة القصوى للقرمز الأبيض، لكن اشتقاقه كان أقل إقناعًا من اشتقاق تشاندراسخار لأنه تظاهر بأن للنجم كثافة ثابتة في جميع أنحاء الجزء الداخلي منه.
5. المعادلة التفاضلية هي تلك التي تجمع في صيغة واحدة دوال مختلفة ومعدلات تغيرها، أي الدوال و«اشتقاقاتها». وفي معادلة تشاندراسخار التفاضلية، كانت الدوال هي كثافة النجم وضغطه وقوة جاذبيته، وكانت تلك دوال في المسافة من مركز النجم. وكانت المعادلة التفاضلية عبارة عن علاقة بين هذه الدوال ومعدل تغيرها باعتبار المسافة إلى الخارج عبر النجم. يُقصد بـ«حل المعادلة التفاضلية» «حساب الدوال نفسها باستخدام هذه المعادلة التفاضلية».

الفصل الخامس: الانفجار الداخلي إجباري

هو الفصل الذي فيه سنعرف أن حتى القوى النووية والتي هي أقوى من كل القوى لا يمكنها مقاومة بطش الجاذبية

زفيكي

فريتز زفيكي، الذي اعتبره العديد من الزملاء في ثلاثينيات وأربعينيات القرن العشرين أنه مهرج مزعج.

ستنظر إليه الأجيال القادمة من علماء الفلك باعتباره عبقرًا مبدعًا.

يقول ويليام فاوولر، الذي كان حينها طالبًا في معهد كالتيك (معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا) حيث كان زفيكي يدرّس للطلاب ومنخرطًا في أبحاثه: «في الوقت الذي تعرفت فيه على فريتز في عام 1933، كان مقتنعًا تمامًا بأنه يمتلك المسار الداخلي للمعرفة النهائية، وأن الجميع كانوا مخطئين». يتذكر جيسي جرينشتاين، زميل زفيكي في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا منذ أواخر الأربعينيات وما تلاها، باعتباره «نصّب نفسه عبقرًا. لم يكن ثمة شك في أنه يتمتع بعقل استثنائي للغاية. لكنه كان أيضًا -على الرغم من أنه لم يعترف بذلك- غير مثقف وغير متحكم في نفسه. درس مادة من الفيزياء وكان قبوله أمرًا ممتعًا. إذا كان يعتقد أن الشخص الذي يدرس على يده مخلص بما فيه الكفاية لأفكاره، هنا فقط يمكنه قبول هذا الشخص. كان وحيدًا جدًا [بين أعضاء هيئة تدريس الفيزياء في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا] ولم يكن يحظى بشعبية لدى المؤسسة... غالبًا ما تضمنت منشوراته هجومًا عنيفًا على أشخاص آخرين».

لم يتردد زفيكي -وهو رجل ممتلئ الجسم ومغرور ومستعد دائمًا للقتال- في إعلان مساره الداخلي نحو المعرفة النهائية، أو الترويج للاكتشافات التي قدمتها. في محاضرة بعد محاضرة خلال ثلاثينيات القرن العشرين، وفي مقال منشور بعد مقال، رَوّج لمفهوم

النجم النيوتروني - وهو مفهوم اخترعه زفيكي بنفسه لشرح أصول الظواهر الأكثر نشاطاً التي شاهدها علماء الفلك: المستعرات العظمى، والأشعة الكونية... حتى إنه ظهر على الهواء في برنامج إذاعي بُث على المستوى الوطني للترويج لنجومه النيوترونية. ولكن تحت التدقيق الدقيق، كانت مقالاته ومحاضراته غير مقنعة. لقد احتوت على القليل من الأدلة على أفكاره.

ترددت شائعات بأن روبرت ميليكان (الرجل الذي بنى معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا ليصبح مركزاً قوياً بين المؤسسات العلمية)، عندما سُئل في خضم كل هذا الضجيج عن سبب احتفاظه بزفيكي في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، أجاب: إن بعضاً من أفكار زفيكي الغربية قد تكون صحيحة. لا بد أن ميليكان، على عكس بعض الآخرين في المؤسسة العلمية، قد رأى تلميحات عن عبقرية زفيكي البديهية - العبقرية التي أصبحت معترفاً بها على نطاق واسع فقط بعد خمسة وثلاثين عاماً، عندما اكتشف علماء الفلك نجومًا نيوترونية حقيقية في السماء وتحققوا من بعض ادعاءات زفيكي المبالغ فيها عن هذه النجوم.



فريتز زفيكي بين جمع من العلماء في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا في عام 1931. ويظهر في الصورة أيضاً ريتشارد تولمان (الذي سيكون شخصية مهمة لاحقاً في هذا الفصل)، وروبرت ميليكان، وألبرت أينشتاين. [بإذن من أرشيف معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا].

من بين ادعاءات زفيكي، الأكثر صلة بهذا الكتاب، هو دور النجوم النيوترونية كجثث نجمية. وكما سنرى، فإن النجم العادي الذي يكون ضخماً جداً بحيث لا يمكن أن يموت مودة القزم الأبيض قد يموت مودة النجم النيوتروني بدلاً من ذلك. إذا ماتت جميع النجوم الضخمة بهذه الطريقة، فستنفذ الكون من أفطع الجثث النجمية المفترضة: الثقوب السوداء. مع تحول النجوم الخفيفة إلى أقزام بيضاء عند موتها، والنجوم الثقيلة إلى نجوم نيوترونية، لن تكون هناك طريقة للطبيعة لتكوين ثقب أسود. سوف يتنفس أينشتاين وإدينجتون -ومعظم علماء الفيزياء والفلك في ذلك العصر- الصعداء.

أغرى ميليكان زفيكي بالانضمام إلى معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا في عام 1925. توقع ميليكان أن يقوم زفيكي بأبحاث نظرية حول هياكل الذرات والبلورات باستخدام الميكانيكا الكمومية، ولكن مع الوقت خلال أواخر عشرينيات وأوائل ثلاثينيات القرن العشرين، انجذب زفيكي إلى الفيزياء الفلكية. كان من الصعب ألا ينبهر المرء بالكون الفلكي عندما يعمل المرء في باسادينا، إنه ليس موطن معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا فحسب، بل موطن مرصد جبل ويلسون أيضاً، الذي كان يضم أكبر تلسكوب في العالم باستخدام عاكس يبلغ قطره 2.5 متر (100 بوصة).

في عام 1931، تعلق زفيكي بفالتر بادى، وهو وافد جديد إلى جبل ويلسون من هامبورج وجوتنجن، وعالم فلكي رائع في مجال الرصد الفلكي. كان لدى بادى وزفيكي خلفية ثقافية مشتركة: كان بادى ألمانياً، وكان زفيكي سويسرياً، وكان كلاهما يتحدث بالألمانية كلغة أم. كما أنهما تشاركا في احترام الألق العقلي لبعضهما. ولكن في هذا المكان انتهت القواسم المشتركة أيضاً. كان مزاج بادى مختلفاً عن مزاج زفيكي. لقد كان متحفظاً وفخوراً ومن الصعب التعرف على انطباعاته عن الآخرين، وبشكل عام كان مثقفاً جيداً، ومتسامحاً مع خصوصيات زملائه. سيختبر زفيكي مدى تسامح بادى خلال السنوات القادمة حين سينفصلان هو وزفيكي بعنف أخيراً خلال الحرب العالمية الثانية. «وصف زفيكي بادى بأنه نازي -وهو لم يكن كذلك- وأبدى بادى خوفه من أن يقتله زفيكي. لقد أصبحا ثنائياً خطيراً إلى درجة أنه لا يمكنهما أن يبقيا معاً في نفس الغرفة»، هكذا يتذكر جيسي جرينشتاين.

خلال عامي 1932 و1933، غالباً ما شوهد بادى وزفيكي في باسادينا، وهما يتحدثان بحيوية باللغة الألمانية عن النجوم التي تسمى «المستعرات»، والتي تنفج فجأة وتتلق

أكثر سطوعًا بمقدار 10000 مرة عن ذي قبل؛ وبعد شهر تقريبًا، تعود الأمور ببطء إلى طبيعتها.

كان بادى، بمعرفته الموسوعية بعلم الفلك، على دراية بأدلة مبدئية تشير إلى أنه بالإضافة إلى هذه المستعرات «العادية»، قد تكون هناك أيضًا مستعرات غير عادية ونادرة وفائقة السطوع. لم يشك علماء الفلك في البداية في أن تلك المستعرات فائقة السطوع، ذلك أنها ظهرت من خلال التلسكوبات بنفس سطوع المستعرات العادية تقريبًا. ومع ذلك، فقد أقاموا في سدم غير مألوفة («سحب» مشرقة)؛ وفي عشرينيات القرن الماضي، بدأت عمليات الرصد في جبل ويلسون وأماكن أخرى في إقناع علماء الفلك بأن تلك السدم لم تكن مجرد سحب من الغاز في مجرتنا درب التبانة - كما كان يُعتقد - بل كانت مجرات تضم تجمعات عملاقة والتي قد تبلغ 1012 (تريليون) نجم بعيدًا عن مجرتنا. إن المستعرات النادرة التي تُرى في هذه المجرات - بسبب أنها أبعد كثيرًا من المستعرات العادية في مجرتنا - يجب أن تكون في جوهرها أكثر سطوعًا بمراحل عن المستعرات العادية كي تظهر بمثل هذا السطوع الذي يُرى من الأرض.

جمع بادى من الأدبيات المنشورة جميع بيانات الرصد التي تمكّن من العثور عليها حول كل من المستعرات الستة فائقة السطوع التي رآها علماء الفلك منذ مطلع القرن. دَمَج هذه البيانات مع جميع معلومات الرصد التي يمكنه الحصول عليها حول المسافات بيننا وبين تلك المجرات التي تحويها، ومن هذا المزج حسب قيمة شدة الضوء الذي تصدره المستعرات فائقة السطوع. كان استنتاجه مذهلاً: في أثناء اشتعال هذه المستعرات فائقة السطوع، تصبح عادةً أكثر سطوعًا بـ 108 (100 مليون) مرة من سطوع شمسنا! (نعلم اليوم، ويرجع الفضل في ذلك إلى حد كبير إلى عمل بادى نفسه في عام 1952، أن تقدير المسافات في ثلاثينيات القرن العشرين كان أقل بما يقرب من 10 أضعاف، وأن المستعرات فائقة السطوع بالتالي 1 أكثر سطوعًا بنحو 10^{10} - 10 مليار مرة - من سطوع شمسنا).



المجرة NGC 4725 في كوكبة الهلبة أو الذؤابة. على اليسار: كما صُورت في 10 مايو 1940، قبل انفجار المستعر الأعظم. على اليمين: في 2 يناير 1941 في أثناء انفجار المستعر الأعظم. يشير الخط الأبيض إلى المستعر الأعظم، في الأطراف الخارجية للمجرة. ومن المعروف الآن أن هذه المجرة تبعد 30 مليون سنة ضوئية عن الأرض وتحتوي على 1011×3 (ثلث تريليون) نجم. [بإذن من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا].

كان زفيكي، عاشق التطرف، مفتونًا بهذه المستعرات فائقة السطوع. ناقشها هو وبادي كثيرًا وصاغ لها اسم المستعرات العظمى. لقد افترضا (بشكل صحيح) أن كل مستعر أعظم نتج عن انفجار نجم عادي، وأن الانفجار ساخنًا جدًا، كما اشتبهها (هذه المرة بشكل غير صحيح)، لدرجة أنه أطلق طاقة أكبر بكثير على شكل ضوء فوق بنفسجي وأشعة سينية مقارنة بالضوء العادي. وبما أن الضوء فوق البنفسجي والأشعة السينية لا يمكنهما اختراق الغلاف الجوي للأرض، فإنه من المستحيل قياس مقدار الطاقة التي تحتويها. ومع ذلك، يمكن للمرء أن يحاول تقدير طاقتها من خلال طيف الضوء المرصود وقوانين الفيزياء التي تحكم الغاز الساخن في المستعر الأعظم المتفجر.

من خلال الجمع بين معرفة بادي من ملاحظات الرصد وبالمستعرات العادية وفهم زفيكي للفيزياء النظرية، استنتج بادي وزفيكي (بشكل غير صحيح) أن الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية الصادرة عن المستعر الأعظم يجب أن تحمل ما لا يقل عن 10000 وربما 10 ملايين مرة قدر الطاقة التي يحملها الضوء المرئي وربما أكثر. وسرعان ما افترض زفيكي -الذي كان يحب التطرف- أن القيمة التقديرية الأكبر، وهي 10 ملايين، كانت صحيحة واستشهد بها بحماس.

هذه القيمة (العامل) (غير الصحيح) البالغة 10 ملايين تعني أنه خلال الأيام العديدة التي يكون فيها المستعر الأعظم في أشد سطوعه، سيطلق كمية هائلة من الطاقة: أكبر تقريباً من مائة مرة قدر الطاقة التي تستشعها شمسنا من الحرارة والضوء خلال كامل الـ 10 مليارات سنة التي هي عمر شمسنا. وهذا يعادل تقريباً نفس القدر من الطاقة الذي يمكن للمرء الحصول عليه إذا تمكن من تحويل عُشر كتلة شمسنا إلى طاقة ضوئية نقية!

(بفضل عقود من الدراسات الرصدية اللاحقة للمستعرات العظمى -العديد منها أجراها زفيكي نفسه- نعلم الآن أن تقدير بادي-زفيكي لطاقة المستعر الأعظم لم يكن بعيداً عن الواقع. ومع ذلك، فإننا نعلم أيضاً أن حساباتهما لهذه الطاقة كانت معيبة بشدة: كل الطاقة المتدفقة تقريباً تحملها جسيمات تسمى النيوتري노 وليست الأشعة السينية والأشعة فوق البنفسجية كما كانا يعتقدان. لقد حصل بادي وزفيكي على الإجابة الصحيحة بضربة حظ فقط).

ما مصدر طاقة المستعر الأعظم الهائلة هذه؟

لتفسير ذلك، اخترع زفيكي النجم النيوتروني.

كان زفيكي مهتماً بجميع فروع الفيزياء وعلم الفلك، وكان يتخيل نفسه فيلسوفاً. لقد حاول أن يربط بين جميع الظواهر التي واجهها فيما أسماه فيما بعد «الموضوعة المورفولوجية-الشكلية». في عام 1932، كانت الفيزياء النووية هي أكثر المواضيع شيوعاً في الفيزياء أو علم الفلك، وتعنى بدراسة أنوية الذرات. ومن هناك، استخرج زفيكي العنصر الرئيسي لفكرته حول النجم النيوتروني: مفهوم النيوترون.

وبما أن النيوترون سيكون مهماً جداً في هذا الفصل والفصل الذي يليه، فسأبتعد قليلاً عن زفيكي ونجومه النيوترونية كي أشرح اكتشاف النيوترون وعلاقة النيوترونات ببنية الذرات.

بعد صياغة القوانين «الجديدة» للميكانيكا الكمومية في عام 1926 (الفصل الرابع)، أمضى الفيزيائيون السنوات الخمس التالية في استخدام قوانين الميكانيكا الكمومية لاستكشاف العالم الضئيل. لقد كشفوا أسرار الذرات (الإطار 5.1) ومواد مثل الجزيئات، والمعادن، والبلورات، ومادة الأقزام البيضاء والتي تتكون من الذرات. ثم في عام 1931، حول الفيزيائيون انتباههم إلى الداخل نحو قلب الذرات والأنوية الذرية المستقرة في قلبها.

لقد كانت طبيعة نواة الذرة لغزًا كبيرًا. اعتقد معظم الفيزيائيين أنها تتكون من حفنة من الإلكترونات وضعف عدد البروتونات، المرتبطة ببعضها ببعض بطريقة غير مفهومة في ذلك الوقت. ومع ذلك، كان لإرنست رذرفورد في كامبريدج، إنجلترا، فرضية مختلفة: البروتونات والنيوترونات.

الآن، أصبح معروفًا بالفعل وجود البروتونات. لقد اختُبرت مرارًا وتكرارًا في تجارب الفيزياء لعقود، وأصبح من المعروف أنها أثقل بنحو 2000 مرة من الإلكترونات ولها شحنات كهربائية موجبة. لكن النيوترونات كانت غير معروفة.

كان على رذرفورد أن يفترض وجود النيوترون لكي يتمكن من تفسير قوانين الميكانيكا الكمومية للنواة بنجاح. يتطلب التفسير الناجح ثلاثة أشياء:

(1) يجب أن يكون لكل نيوترون نفس كتلة البروتون تقريبًا، ولكن من دون شحنة كهربائية.

(2) يجب أن تحتوي كل نواة على عدد من النيوترونات تقريبًا بنفس عدد البروتونات.

(3) جميع النيوترونات والبروتونات يجب أن ترتبط معًا بإحكام في نواتها الصغيرة بواسطة نوع جديد من القوة، ليس من القوة الكهربائية ولا من قوة الجاذبية، ستمسمى بطبيعة الحال بالقوة النووية. (وتسمى الآن أيضًا القوة القوية (النووية))، ستعارض النيوترونات والبروتونات احتجازهما معًا في النواة من خلال حركات خانقة وغير منتظمة وعالية السرعة؛ هذه الحركات من شأنها أن تنتج ضغط الانتكاس. وهذا الضغط من شأنه أن يوازن القوة النووية، ويُبقي النواة ثابتة عند حجمها الذي يبلغ نحو 10^{-13} سنتيمتر.

الإطار 5.1

الهياكل الداخلية للذرات

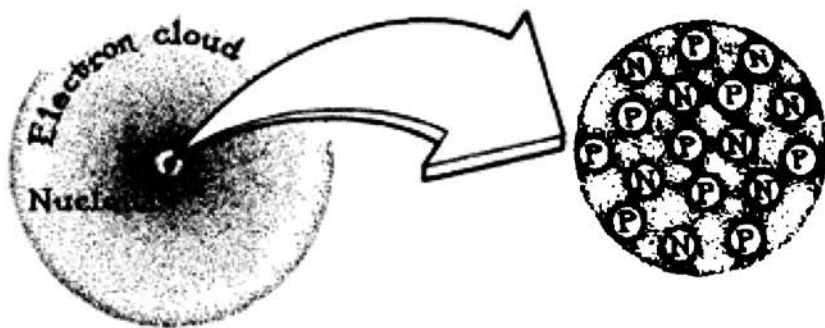
تتكون الذرة من سحابة من الإلكترونات تحيط بنواة مركزية ضخمة. يبلغ حجم السحابة الإلكترونية نحو 10^{-8} سنتيمتر (نحو جزء من المليون من قطر شعرة الإنسان)، والنواة الموجودة في قلبها أصغر بـ 100000 مرة؛ أي نحو 10^{-13} سنتيمتر؛ انظر الرسم البياني أدناه. إذا افترضنا أن السحابة الإلكترونية بحجم الأرض، فإن النواة ستصبح بحجم ملعب كرة قدم. على الرغم من حجمها الصغير، فإن النواة أثقل بعدة آلاف المرات من السحابة الإلكترونية الهشة.

تحتفظ الذرة بالإلكترونات ذات الشحنة السالبة في سحابتها عن طريق الجذب الكهربائي عن طريق النواة ذات الشحنة الموجبة، لكنها لا تسقط في النواة لنفس السبب الذي يمنع النجم القزم الأبيض من الانفجار: قانون الميكانيكا الكمومية الذي يسمى بـ«مبدأ باولي للاستبعاد»، والذي يمنع أكثر من إلكترونين من شغل نفس المنطقة من المساحة (أو الفراغ) في نفس الزمن (يمكن لاثنتين أن يفعل ذلك إذا كان لهما لف مغزلي متعاكس، وهي مسألة دقيقة تجاهلناها في الفصل الرابع). ولذلك تقترب إلكترونات السحابة معًا في خلايا تسمى «المدارات». كل زوج من الإلكترونات، احتجاجًا على احتجازه في خليته الصغيرة، يخضع لحركات غير منتظمة وعالية السرعة «رهاب الأماكن المغلقة»، مثل تلك التي تحدث للإلكترونات الموجودة في نجم من نوع القزم الأبيض (الفصل الرابع). تؤدي هذه الحركات إلى ظهور «ضغط انتكاس الإلكترون»، وهو الذي يقاوم الجذب الكهربائي للنواة. وهكذا، يمكن للمرء أن يفكر في الذرة كنجم قزم أبيض صغير، ذي قوة كهربائية وليست قوة جاذبية تسحب الإلكترونات إلى الداخل، وبضغط انتكاس للإلكترونات والذي يدفع السحابة الإلكترونية إلى الخارج.

الشكل الأيمن أدناه يرسم بنية النواة الذرية، كما ناقشناها في النص؛ إنها عبارة عن مجموعة صغيرة من البروتونات والنيوترونات، متماسكة معًا بواسطة القوة النووية.

ATOM

NUCLEUS



a few $\times 10^{-8}$ centimeter

a few $\times 10^{-13}$ centimeter

في عام 1931 وأوائل عام 1932، تنافس الفيزيائيون التجريبيون بقوة بعضهم مع بعض لاختبار هذا الوصف للنواة. وكانت الطريقة هي محاولة إخراج بعض نيوترونات رذرفورد المفترضة من الأنوية الذرية عن طريق قصف الأنوية بإشعاعات عالية الطاقة. فاز بالمسابقة في فبراير 1932 عضو فريق رذرفورد التجريبي، جيمس تشادويك. نجح قصف تشادويك، وظهرت النيوترونات بغزارة، وكانت تمتلك الخصائص التي افترضها رذرفورد. أعلن عن هذا الاكتشاف وسط ضجة كبيرة في الصحف حول العالم، ومن الطبيعي أن يلفت انتباه زفيكي.

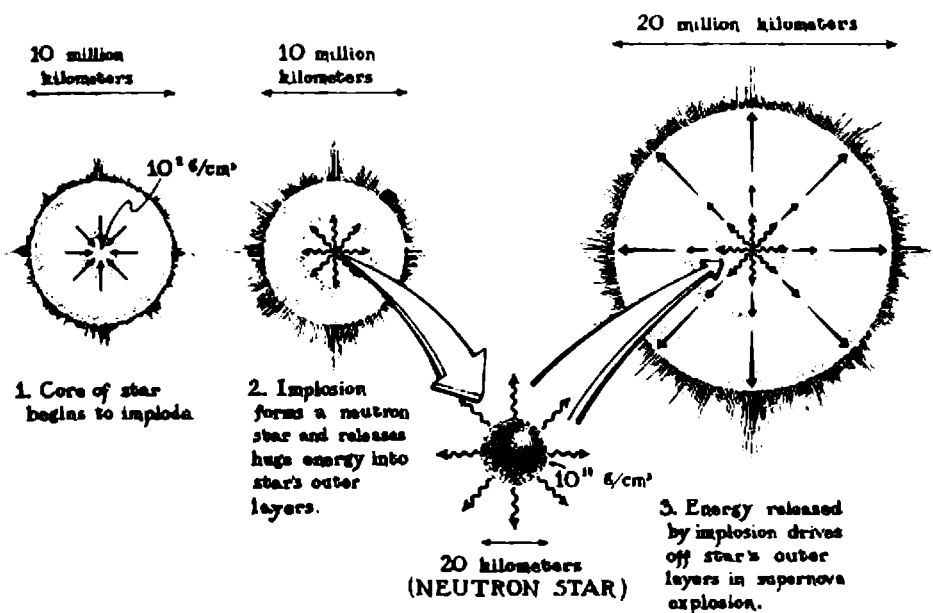
طغى النيوترون على المشهد في نفس العام الذي كان فيه بادي وزفيكي يكافحان لفهم المستعرات العظمى. بدا لزفيكي أن هذا النيوترون هو ما يحتاجان إليه تمامًا. ورأى أنه ربما يمكن جعل نواة النجم العادي، بكثافة 100 جرام لكل سنتيمتر مكعب، تنفجر حتى تصل إلى كثافة مثل كثافة النواة الذرية، (10^{14} تريليون) جرام لكل سنتيمتر مكعب. وربما تتحول المادة الموجودة في ذلك القلب النجمي المنكمش إلى «غاز» من النيوترونات - وهو «نجم نيوتروني» كما أسماه زفيكي. إذا كان الأمر كذلك، تبعًا لحسابات زفيكي (وهو صحيح في هذه الحالة)، فإن الجاذبية الشديدة للنواة المنكمشة ستربطها معًا بإحكام شديد، بحيث لن ينخفض محيطها فحسب، بل ستنكمش كتلتها أيضًا. وستكون كتلة النواة النجمية الآن أقل بنسبة 10 ٪ مما كانت عليه قبل الانفجار الداخلي.

إذا، أين ذهبت نسبة الـ 10 ٪ من كتلة النواة؟

إلى الطاقة المتفجرة خارجيًا، هكذا فكر زفيكي (بشكل صحيح مرة أخرى؛ انظر الشكل 5.1 والإطار 5.2).

إذا كانت كتلة النواة النجمية المنكمشة، كما اعتقد زفيكي (بشكل صحيح)، تساوي تقريبًا كتلة الشمس، فإن نسبة الـ 10 ٪ منها التي تتحول إلى طاقة متفجرة (خارجيًا)، عندما يصبح القلب نجمًا نيوترونيًا، ستنتج 10^{46} جول، وهي قريبة من الطاقة التي اعتقد زفيكي أنها ضرورية لإمداد مستعر أعظم بالطاقة. قد تؤدي الطاقة المتفجرة (خارجيًا) إلى تسخين الطبقات الخارجية من النجم إلى درجة حرارة هائلة ثم ستطلقها في الفضاء بين-النجمي (الشكل 5.1)، وعندما سينفجر النجم، فإن درجة حرارته المرتفعة قد تجعله يلمع بشكل ساطع تمامًا بنفس طريقة المستعرات العظمى التي تنبأ بها وكما حددها بادي.

لم يكن زفيكي يعرف ما الذي قد يؤدي إلى انفجار نواة النجم داخليًا وتحويله إلى نجم نيوتروني، كما لم يعرف كيف يمكن أن يتصرف قلب النجم في أثناء انفجاره الداخلي، وبالتالي لم يتمكن من تقدير المدة التي سيستغرقها الانفجار الداخلي (هل هو انكماش بطيء أم انفجار داخلي بسرعة عالية؟). (لما ظهرت التفاصيل الكاملة في نهاية المطاف في الستينيات وما بعدها، تبين أن النواة تنفجر داخليًا بعنف، إذ تدفعها جاذبيتها الشديدة إلى الانفجار من حجم الأرض تقريبًا إلى محيط 100 كيلومتر في أقل من 10 ثوانٍ). لم يفهم زفيكي أيضًا بالتفصيل كيف يمكن للطاقة الناتجة عن انكماش القلب أن تؤدي إلى انفجار خارجي للمستعر الأعظم، أو لماذا سيتألق حطام الانفجار بشكل ساطع للغاية لبضعة أيام ويظل ساطعًا تمامًا لبضعة أشهر، بدلًا من بضع ثوانٍ أو ساعات أو سنوات. لكنه كان يعلم -أو ظن أنه يعلم- أن الطاقة المنطلقة من تشكل النجم النيوتروني هي الكمومية المناسبة، وكان ذلك كافيًا بالنسبة إليه.



5.1 فرضية فريتز زفيكي لإثارة الانفجارات الخارجية للمستعر الأعظم: تأتي الطاقة المتفجرة (خارجيًا) للمستعر الأعظم من انفجار قلب النجم ذي الكثافة الطبيعية لتكوين نجم نيوتروني.

5.2. الإطار

تبادل الكتلة والطاقة

إن الكتلة -وفقاً لقوانين النسبية الخاصة لأينشتاين- هي مجرد شكل مضغوط جداً من الطاقة. ومن الممكن، رغم أن كيفية ذلك أمر غير عادي، تحويل أي كتلة -بما في ذلك كتلة الشخص- إلى طاقة متفجرة. كمية الطاقة التي تأتي من هذا التحويل هائلة. لقد تحصلنا على هذا المفهوم من خلال صيغة أينشتاين الرياضية الشهيرة $E = Mc^2$ ، حيث E هي الطاقة المتفجرة، و M هي الكتلة التي تتحول إلى طاقة، و $c = 2.99792 \times 10^8$ متر في الثانية هي سرعة الضوء. باستخدام 75 كيلوجراماً من كتلة شخص نموذجي، تنتبأ هذه الصيغة بطاقة متفجرة تبلغ 7×10^{18} جول، وهي أكبر بثلاثين مرة من طاقة أقوى قبلة هيدروجينية فُجّرتها البشرية حتى الآن على الإطلاق.

إن تحويل الكتلة إلى حرارة أو إلى طاقة حركية للانفجار هو المعنى الكامن خلف تفسير زفيكي للمستعرات العظمى (الشكل 5.1)، وكذلك خلف الاحتراق النووي الذي يُبقي الشمس ساخنة (لاحقاً في هذا الفصل)، والانفجارات النووية (الفصل التالي).

لم يكن زفيكي يكتفي بشرح المستعرات العظمى فحسب، بل أراد أن يشرح كل شيء في الكون. من بين كل الأشياء غير المبررة، كان الشيء الذي حظي بأكبر قدر من الاهتمام في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا في عامي 1932 و 1933 هو الأشعة الكونية، وهي جسيمات عالية السرعة تقصف الأرض من الفضاء. كان روبرت ميليكان من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا رائداً عالمياً في دراسة الأشعة الكونية وقد أطلق عليها اسمها، كما اكتشف كارل أندرسون من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا أن بعض جسيمات الأشعة الكونية مصنوع من المادة المضادة². تمكن زفيكي، بحبه للتطرف، من إقناع نفسه (بشكل صحيح كما تبين) أن معظم الأشعة الكونية تأتي من خارج نظامنا الشمسي، و(بشكل غير صحيح) أن معظمها قادم من خارج مجرتنا درب التبانة -في الواقع، من أبعد حدود الكون- ثم أقنع نفسه (بشكل صحيح تقريباً) بأن إجمالي الطاقة التي تحملها جميع الأشعة الكونية في الكون كانت تقريباً نفس إجمالي الطاقة الصادرة من المستعرات

العظمى في جميع أنحاء الكون. كان الاستنتاج واضحًا لزيكي (وربما كان صحيحًا): تتكون الأشعة الكونية من انفجارات المستعرات العظمى.

كان ذلك في أواخر عام 1933 عندما أقنع زيكي نفسه بهذه الروابط بين المستعرات العظمى والنيوترونات والأشعة الكونية. وبما أن معرفة بادي الموسوعية بعلم الفلك الرصدي كانت أساسًا حاسمًا لهذه الروابط، وبما أن العديد من حسابات زيكي والكثير من تفكيره قد حققها الأخذ والرد اللفظي مع بادي، فقد وافق زيكي وبادي على تقديم عملهما معًا في اجتماع للجمعية الفيزيائية الأمريكية في جامعة ستانفورد، والتي تبعد مسيرة يوم واحد باستخدام السيارة بين الساحل وباسادينا. يظهر ملخص حديثهما، المنشور في عدد 15 يناير 1934 من مجلة المراجعات الفيزيائية *Physical Review*، في الشكل 5.2، على أنه واحد من أكثر الوثائق بصيرة في تاريخ الفيزياء وعلم الفلك.

ويؤكد بشكل جلي وجود المستعرات العظمى كثفة متميزة من الأجسام الفلكية - على الرغم من أن البيانات الكافية التي تثبت بشكل قاطع أنها مختلفة عن المستعرات العادية لن يقدمها بادي وزيكي إلا بعد أربع سنوات، في عام 1938. ويقدم الكتاب لأول مرة تسمية «المستعرات العظمى» لهذه الأجرام السماوية. إنه يقدر بشكل صحيح إجمالي الطاقة المنبعثة من المستعر الأعظم. وتشير هذه النظرية إلى أن الأشعة الكونية تنتج عن المستعرات العظمى - وهي فرضية لا تزال تعتبر معقولة في عام 1993، ولكنها لم تثبت بشكل قاطع (انظر الحاشية السفلية 3). لقد اخترع مفهوم النجم المصنوع من النيوترونات - وهو المفهوم الذي لن يصبح مقبولًا على نطاق واسع باعتباره قابلاً للتطبيق من الناحية النظرية حتى عام 1939 ولن يتحقق بالملاحظة الرصدية حتى عام 1968. ولقد صاغ اسم النجم النيوتروني لهذا المفهوم. ويقترح «بكل تحفظ» (عبارة يفترض أن من أدخلها هو بادي المعروف عنه الحذر) أن المستعرات العظمى تنتج عن طريق تحول النجوم العادية إلى نجوم نيوترونية - وهو اقتراح لم يثبت أنه قابل للتطبيق من الناحية النظرية إلا في أوائل الستينيات، وسيؤكد بواسطة الملاحظات الرصدية فقط في أواخر الستينيات مع اكتشاف النجوم النابضة (النجوم النيوترونية الممغنطة التي تدور حول نفسها) داخل الغاز المتفجر للمستعرات العظمى القديمة.

**Proceedings
of the
American Physical Society**

MINUTES OF THE STAMFORD MEETING, DECEMBER 15-16, 1933

31. Supernovae and Cosmic Rays. W. BAARD, *Mt. Wilson Observatory*, and F. ZWUCKY, *California Institute of Technology*.—Supernovae flare up in every stellar system (nebula) once in several centuries. The lifetime of a supernova is about twenty days and its absolute brightness at maximum may be as high as $M_{10} = -14^m$. The visible radiation L_v of a supernova is about 10^4 times the radiation of our sun, that is, $L_v = 3.78 \times 10^{36}$ ergs/sec. Calculations indicate that the total radiation, visible and invisible, is of the order $L_t = 10^4 L_v = 3.78 \times 10^{40}$ ergs/sec. The supernova therefore emits during its life a total energy $E_t \geq 10^4 L_v = 3.78 \times 10^{40}$ ergs. If supernovae initially are

quite ordinary stars of mass $M < 10^{31}$ g., E_t/m is of the same order as M itself. In the supernova process mass is built up annihilated. In addition the hypothesis suggests itself that cosmic rays are produced by supernovae. Assuming that in every nebula one supernova occurs every thousand years, the intensity of the cosmic rays to be observed on the earth should be of the order $\sigma = 2 \times 10^{-8}$ erg/cm² sec. The observational values are about $\sigma = 3 \times 10^{-8}$ erg/cm² sec. (Mäkelä, Regener). With all reserve we advance the view that supernovae represent the transitions from ordinary stars into neutron stars, which in their final stage consist of extremely closely packed neutrons.

5.2 ملخص محاضرة المستعرات العظمى والنجوم النيوترونية والأشعة الكونية التي ألقاها والتر بادي وفريتز زفيكي في جامعة ستانفورد في ديسمبر 1933.

استجاب علماء الفلك في الثلاثينيات بحماس لمفهوم بادي-زفيكي عن المستعر الأعظم، لكنهم تعاملوا مع أفكار زفيكي حول النجم النيوتروني والأشعة الكونية ببعض الازدراء. كان الإجماع العام هو «فكرة مغرقة في الخيال» -ويمكن للمرء أن يضيف، وهو أمر صحيح تمامًا- أنها فكرة تكونت «بناء على حسابات غير موثوقة». لم يقدم أي شيء في كتابات زفيكي أو محادثاته أكثر من تلميحات ضئيلة لإثبات هذه الأفكار. في الواقع، يتضح لي من دراسة مفصلة لكتابات زفيكي في ذلك العصر أنه لم يفهم قوانين الفيزياء جيدًا بما يكفي ليتمكن من إثبات أفكاره. وسأعود إلى هذا لاحقًا في هذا الفصل.

بعض المفاهيم في العلوم تكون واضحة جدًا عند الرجوع إلى الماضي لدرجة أنك قد تندش أن أحدًا لم يلاحظها من قبل. هذه هي حال علاقة بين-النجوم النيوترونية والثقوب السوداء. كان من الممكن أن يبدأ زفيكي في إقامة هذا الارتباط منذ عام 1933، لكنه لم يفعل؛ سيظهر بطريقة مبدئية بعد ست سنوات وبشكل نهائي بعد ربع قرن. إن الطريق الصعب الذي مرَّغ أنوف الفيزيائيين أخيرًا في هذا الارتباط (بين-النجوم النيوترونية والثقوب السوداء) سوف يحتل معظم ما تبقى من هذا الفصل.

لكي نقدر قصة الكيفية التي توصل بها الفيزيائيون إلى التعرف على العلاقة بين النجم النيوتروني والثقوب الأسود، فمن المفيد أن نعرف شيئاً عن العلاقة المتقدمة بينهما. ثم الاستطراد التالي:

ما مصير النجوم عند وفاتها؟ كشف الفصل الرابع عن إجابة جزئية، وهي إجابة مجسدة في الجزء الأيمن من الشكل 5.3 (وهو نفس الشكل 4.4). تعتمد هذه الإجابة على ما إذا كان النجم أقل كتلة أو أكبر من 1.4 شمس (حد تشاندراسخار للكتلة القصوى).

إذا كان النجم أقل كتلة من حد تشاندراسخار، على سبيل المثال إذا كان النجم هو الشمس نفسها، فإنه في نهاية حياته يتبع المسار المسمى «موت الشمس» في الشكل 5.3. عندما يشع الضوء في الفضاء، فإنه يبرد تدريجياً، ويفقد ضغطه الحراري (النجم عن الحرارة). ومع انخفاض ضغطه، لن يكون قادراً (الشمس أو النجم) على تحمل السحب الداخلي لجاذبيته؛ جاذبيته تجبره على الانكماش.

ومع الانكماش، فإنه يتحرك نحو اليسار في الشكل 5.3 نحو أطوال المحيطات الأصغر، مع البقاء دائماً على نفس الارتفاع في الشكل لأن كتلته لا تتغير. (لاحظ أن الشكل يرسم الكتلة لأعلى وطول المحيط إلى اليمين). وبينما ينكمش النجم، يضغط النجم على الإلكترونات الموجودة في داخله إلى خلايا أصغر فأصغر، حتى تمنع الإلكترونات هذا الانكماش في النهاية عن طريق ضغط انتكاس قوي لدرجة أن النجم لا يستطيع الانكماش أكثر. يقاوم ضغط الانتكاس السحب الداخلي لجاذبية النجم، مما يجبر النجم على الاستقرار في قبر قزم أبيض على منحني الحدود الفاصلة (منحني القزم الأبيض) بين المنطقة البيضاء في الشكل 5.3 والمنطقة المظلمة.

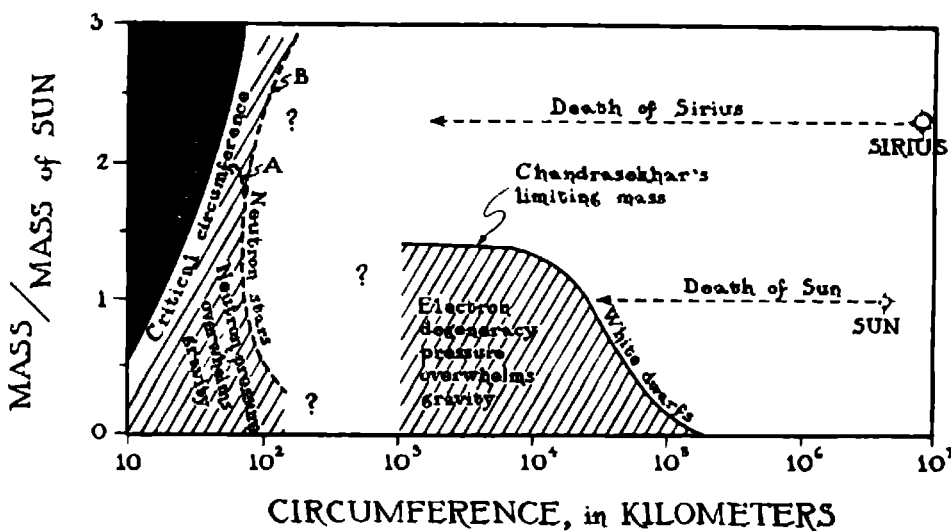
إذا انكمش النجم أكثر (أي تحرك يساراً من منحني القزم الأبيض إلى المنطقة المظلمة)، فإن ضغط انتكاس الإلكترون الخاص به سيزداد قوة ويجعل النجم يتوسع مرة أخرى إلى منحني القزم الأبيض. إذا توسع النجم في المنطقة البيضاء، فإن ضغط الانتكاس الإلكتروني الخاص به سيضعف، مما يسمح للجاذبية بتقليصه مرة أخرى إلى منحني القزم الأبيض. وبالتالي، ليس أمام النجم خيار سوى البقاء إلى الأبد على منحني القزم الأبيض، حيث تتوازن الجاذبية مع الضغط بشكل مثالي، ثم يبرد تدريجياً ويتحول إلى قزم أسود -جسم بارد ومظلم وصلب بحجم الأرض تقريباً ولكن له كتلة مثل كتلة الشمس.

إذا كان النجم أكبر من كتلة تشاندرا سحار البالغة 1.4 مرة من الكتلة الشمسية، على سبيل المثال، إذا كان النجم الشعري اليمانية، فإنه في نهاية حياته سيتبع المسار المسمى «موت الشعري اليمانية». وبينما يبت إشعاعاته فيبرد وينكمش، ويتحرك يسارًا في هذا المسار إلى محيط أصغر فأصغر، وتنضغط الإلكتروناته إلى خلايا أصغر فأصغر؛ فإن الإلكترونات تمنع هذا الانكماش بضغط انتكاس متزايد، لكنها تمنع الانكماش من دون فائدة. بسبب كتلته الكبيرة، فإن جاذبية النجم تكون قوية بما يكفي لإخماد كل ممانعات الإلكترونات. لا يمكن للإلكترونات أبدًا أن تنتج ما يكفي من ضغط الانتكاس لموازنة جاذبية النجم؛ يجب على النجم، على حد تعبير آرثر إدينجتون، «أن يستمر في الإشعاع والمزيد من الإشعاع، والانكماش والمزيد من الانكماش، حتى يفترض أنه سيصل إلى نصف قطر يبلغ بضعة كيلومترات، عندما تصبح الجاذبية قوية بما يكفي للاحتفاظ بالإشعاع، ثم يرقد النجم أخيرًا في سلام».

أو هكذا سيكون مصيره لولا النجوم النيوترونية. إذا كان زفيكي على حق في إمكانية وجود النجوم النيوترونية، يجب أن تكون مشابهة إلى حد ما لنجوم القزم الأبيض، ولكن مع ضغطها الداخلي الناتج عن النيوترونات بدلًا من الإلكترونات. هذا يعني أنه يجب أن يكون هناك منحنى نجم نيوتروني في الشكل 5.3، مشابهًا لمنحنى القزم الأبيض، ولكن عند محيط (محدد على المحور الأفقي) يبلغ نحو مائة كيلومتر، بدلًا من عشرات الآلاف من الكيلومترات. في منحنى النجم النيوتروني هذا، من شأن الضغط النيوتروني أن يوازن الجاذبية بشكل مثالي، لذلك يمكن للنجوم النيوترونية أن تستقر هناك إلى الأبد.

لنفترض أن منحنى النجم النيوتروني يمتد لأعلى في الشكل 5.3 ليصل إلى كتل كبيرة؛ أي لنفترض أنه يحتوي على الشكل المسمى B في الشكل. إذن، عند موت الشعري اليمانية فإنه لا يستطيع أن يخلق ثقبًا أسود. وبدلًا من ذلك، سوف ينكمش الشعري اليمانية حتى يصل إلى منحنى النجم النيوتروني، وبعد ذلك لن يتمكن من الانكماش أكثر. وإذا حاول الانكماش أكثر (أي التحرك من يسار منحنى النجم النيوتروني إلى المنطقة المظللة)، فإن النيوترونات الموجودة بداخله سوف تعترض (تحتج) على تعرضها للضغط؛ وسوف تنتج ضغطًا كبيرًا (جزئيًا بسبب الانتكاس؛ أي «رهاب الأماكن المغلقة»، وجزئيًا بسبب القوة النووية)؛ وسيكون الضغط كبيرًا بما يكفي لتتفوق على الجاذبية وستدفع النجم إلى الخارج. إذا حاول النجم التوسع مرة أخرى في المنطقة البيضاء، فسوف ينخفض ضغط النيوترونات

بما يكفي لتتولى الجاذبية المسؤولية وتضغطه مرة أخرى إلى الداخل. وبالتالي، لن يكون أمام الشعري اليمانية خيار سوى الاستقرار على منحني النجم النيوتروني والبقاء هناك إلى الأبد، حيث يبرد تدريجيًا ويصبح نجمًا نيوترونيًا أسود صلبًا وباردًا.



5.3 يعتمد المصير النهائي لنجم ذي كتلة أكبر من حد الكتلة لتشاندراسخار والذي يبلغ 1.4 شمس على مدى ضخامة النجوم النيوترونية. إذا كان من الممكن أن تكون ضخمة بشكل لا مبرر له (المنحني B)، فإن نجمًا مثل الشعري اليمانية، عندما يموت، لا يمكن أن يتفجر إلا ليشكل نجمًا نيوترونيًا؛ لا يمكنه أن يشكل ثقبًا أسود. إذا كان هناك حد أعلى لكتلة النجوم النيوترونية (كما هي الحال في المنحني A)، فإن النجم الضخم المحتضر لا يمكن أن يصبح قزمًا أبيض ولا نجمًا نيوترونيًا؛ وما لم تكن هناك مقبرة أخرى متاحة، فسوف يموت مونة الثقب الأسود.

لنفترض -بدلاً من ذلك- أن منحني النجم النيوتروني لا يمتد لأعلى في الشكل 5.3 إلى كتل كبيرة، ولكنه ينحني بطريقة المنحني الافتراضي المسمى A. وهذا يعني أن هناك كتلة قصوى يمكن لأي نجم نيوتروني أن يمتلكها، وهو مشابه لحد تشاندراسخار الذي يبلغ قدر 1.4 شمس بالنسبة إلى الأقزام البيضاء. فكما هي الحال بالنسبة إلى الأقزام البيضاء، وكذلك بالنسبة إلى النجوم النيوترونية، فإن وجود أقصى كتلة من شأنه أن ييشر بحقيقة بالغة الأهمية: في حالة نجم أكبر من الحد الأقصى، ستفوق الجاذبية تمامًا على

ضغط النيوترون. لذلك، عندما يموت نجم بهذه الضخامة، يجب عليه إما أن يقذف كتلة كافية لجعله أقل من الحد الأقصى للكتلة، وإلا فإنه سوف ينكمش بلا هوادة، تحت تأثير سحب الجاذبية، مباشرة إلى ما بعد منحنى النجم النيوتروني، وبعد ذلك -إذا لم يكن هناك أي نجم آخر متاح كمقابر نجمية، فلن يكون هناك شيء سوى الأقزام البيضاء، والنجوم النيوترونية، والثقوب السوداء، فستستمر في الانكماش حتى تشكل ثقباً أسود.

وبالتالي، فإن السؤال المركزي، السؤال الذي يحمل مفتاح المصير النهائي للنجوم الضخمة، هو: إلى أي مدى يمكن أن تكون كتلة النجم النيوتروني؟ إذا كان من الممكن أن يكون ضخماً للغاية، وأكثر ضخامة من أي نجم عادي، لا يمكن أبداً أن تتشكل الثقوب السوداء في الكون الحقيقي. إذا كان هناك حد أقصى ممكن لكتلة النجوم النيوترونية، ولم يكن هذا الحد الأقصى كبيراً جداً، فسوف تتشكل الثقوب السوداء - ما لم تكن هناك مقبرة نجمية أخرى، لم تكن متوقعة في الثلاثينيات.

هذا المسار من التفكير كان واضحاً للغاية بالرجوع إلى الماضي، لدرجة أنه يبدو من المدهش أن زفيكي لم يتابعه، وتشاندراسخار لم يتابعه، وإدينجتون لم يتابعه. ولو حاول زفيكي متابعة ذلك، لما كان قد ذهب بعيداً؛ لقد كان يفهم القليل جداً من الفيزياء النووية والقليل جداً من النسبية حتى يتمكن من اكتشاف ما إذا كانت قوانين الفيزياء تضع حداً لكتلة النجوم النيوترونية أم لا. ومع ذلك، كان هناك اثنان آخران في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا يفهمان الفيزياء جيداً بما يكفي لاستنتاج كتل النجوم النيوترونية: ريتشارد تشاس تولمان، الكيميائي الذي تحول إلى فيزيائي والذي ألّف كتاباً مرجعياً كلاسيكياً بعنوان النسبية والديناميكا الحرارية وعلم الكونيات؛ جوليوس روبرت أوبنهايمر، الذي قاد فيما بعد الجهود الأمريكية لتطوير القنبلة الذرية.

ومع ذلك، لم يُعَرِّ تولمان وأوبنهايمر أي اهتمام على الإطلاق لنجوم زفيكي النيوترونية. لم يعبراها أي اهتمام، حتى عام 1938، عندما نُشرت فكرة النجم النيوتروني (تحت اسم مختلف قليلاً وهو القلب النيوتروني) من قِبل شخص آخر، شخص كانا يحترمانه، على عكس زفيكي: ليف دافيدوفيتش لاندאו، في موسكو.

لاندائو

في الحقيقة، كان منشور لاندائو عن القلب النيوتروني بمثابة صرخة طلباً للمساعدة: عمليات التطهير التي قام بها ستالين ماضية على قدم وساق في الاتحاد السوفيتي، وأصبح لاندائو في خطر. كان لاندائو يأمل، من خلال إثارة ضجة كبيرة في الصحف بفكرته حول القلب النيوتروني، أن يتمكن من حماية نفسه من الاعتقال والموت. لكن تولمان وأوينهايمر لم يعرفا شيئاً عن هذا.

كان لاندائو في خطر بسبب اتصالاته السابقة مع العلماء الغربيين:

بعد فترة وجيزة من الثورة الروسية، استهدف العلم اهتماماً خاصاً من قبل القيادة الشيوعية الجديدة. وكان لينين نفسه قد أصدر قراراً من خلال المؤتمر الثامن للحزب البلشفي في عام 1919 يعفي العلماء من متطلبات النقاء الأيديولوجي: «إن مشكلة التنمية الصناعية والاقتصادية أنها تتطلب الاستخدام الفوري وعلى نطاق واسع للخبراء في العلوم والتكنولوجيا التي ورثناها من الرأسمالية، على الرغم من أنها حتمًا ملوثة بالأفكار والعادات البرجوازية». كان الوضع المؤسف للفيزياء النظرية السوفيتية مثار قلق خاص لقادة العلوم السوفيتية، لذلك، بمباركة الحزب الشيوعي والحكومة، أحضروا ألمع المنظرين الشباب الواعدين في الاتحاد السوفيتي إلى لينينجراد (سان بطرسبرج) وذلك لاستكمال الدراسات العليا في بضع سنوات، وبعد الانتهاء مما يعادل درجة الدكتوراه، سترسلهم الدولة إلى أوروبا الغربية لمدة سنة أو سنتين لدراسة ما بعد الدكتوراه.

لماذا دراسة ما بعد الدكتوراه؟ لأنه بحلول العشرينيات من القرن العشرين، أصبحت الفيزياء معقدة للغاية لدرجة أن التدريب على مستوى الدكتوراه لم يعد كافياً لإبقائها. ولتعزيز التدريب الإضافي في جميع أنحاء العالم، أنشئ نظام الزمالة لما بعد الدكتوراه، بتمويل كبير من مؤسسة روكفيلر (والتي تحقق أرباحها من المشاريع النفطية للرأسماليين). ويمكن لأي شخص، حتى الماركسيين الروس المتحمسين، أن يتنافسوا على هذه الزمالات. يُطلق على الفائزين «زملاء ما بعد الدكتوراه» أو ببساطة «باحثي ما بعد الدكتوراه».

لماذا أوروبا الغربية لدراسة ما بعد الدكتوراه؟ لأنه في عشرينيات القرن الماضي كانت أوروبا الغربية هي مكة بالنسبة إلى الفيزياء النظرية؛ لقد كانت موطنًا لكل عالم بارز في

العالم في الفيزياء النظرية تقريبًا. ولم يكن أمام القادة السوفييت أي خيار - في سعيهم اليأس لنقل الفيزياء النظرية من أوروبا الغربية إلى الاتحاد السوفييتي - سوى إرسال شباب علماء الفيزياء النظرية إلى هناك للتدريب، على الرغم من مخاطر التلوث الأيديولوجي.

من بين جميع شباب الفيزياء النظرية السوفييت الذين سافروا على الطريق إلى لينينجراد، ثم إلى أوروبا الغربية، ثم عادوا إلى الاتحاد السوفييتي، سيكون ليف دافيدوفيتش لانداو التأثير الأكبر على الفيزياء. وُلد عام 1908 لعائلة يهودية ميسورة الحال (كان والده مهندسًا للبترول في باكو على بحر قزوين)، والتحق بجامعة لينينجراد في سن السادسة عشرة وأنهى دراسته الجامعية في سن التاسعة عشرة. وبعد عامين فقط من الدراسات العليا في معهد لينينجراد للفيزياء التقنية، أكمل ما يعادل درجة الدكتوراه. وذهب إلى أوروبا الغربية، حيث أمضى ثمانية عشر شهرًا من عام 1929 إلى عام 1930 يقوم بجولات في مراكز الفيزياء النظرية الكبرى في سويسرا وألمانيا والدنمارك وإنجلترا وبلجيكا وهولندا.



على اليسار: ليف لانداو، عندما كان طالبًا في لينينجراد في منتصف عشرينيات القرن العشرين.
على اليمين: لانداو، مع زملائه من طلاب الفيزياء جورج جاموف ويفجينيا كانيجيسر، يهزون في خضم دراستهم في لينينجراد، تقريبًا في عام 1927. في الحقيقة، لم يعزف لانداو قط على أي آلة موسيقية. [يسار: بإذن من AIP Emilio Segre Visual Archives، مجموعة مارجريت بور؛ اليمين: إهداء من مكتبة الكونجرس].

كتب زميله في مرحلة ما بعد الدكتوراه في زيورخ، رودولف بيرلز، المولود في ألمانيا في وقت لاحق: «أذكر بوضوح الانطباع العظيم الذي تركه لاندau علينا جميعًا عندما ظهر في قسم فولفجانج باولي في زيورخ في عام 1929. ولم يستغرق الأمر وقتًا طويلاً لاكتشاف عمق فهمه للفيزياء الحديثة، ومهارته في حل المشكلات الأساسية. نادرًا ما كان يقرأ ورقة بحثية عن الفيزياء النظرية بالتفصيل، لكنه ينظر إليها لفترة كافية ليرى ما إذا كانت المشكلة مثيرة للاهتمام أم لا، وإذا كانت مثيرة للاهتمام ينتقل إلى فحص النهج الذي اتبعه المؤلف. ثم يشرع في إجراء الحسابات بنفسه، وإذا اتفقت النتائج مع المؤلف وافق على الورقة. لقد أصبح بيرلز ولاندau أفضل صديقين.

لاندau طويل القامة، نحيف، ينتقد بشدة الآخرين وكذلك نفسه، شعر باليأس لأنه وُلد بعد فوات الأوان بوضع سنوات. كان يعتقد أن العصر الذهبي للفيزياء كان في الفترة من 1925 إلى 1927 عندما ابتكر دي برولي، وشروندنجر، وهايزنبرج، وبور، وآخرون الميكانيكا الكمومية الجديدة؛ لو أنه وُلد في وقت سابق، كان بإمكانه أن يكون مشاركًا في إنتاج الميكانيكا الكمومية: «لقد اختطفت جميع الفتيات اللطيفات وتزوجن، وحُلَّت جميع المشكلات اللطيفة. أنا لا أحب أيًا من هذه الأشياء التي تبقت». هكذا قال في لحظة يأس في برلين عام 1929. في الحقيقة، كانت استكشافات تبعات قوانين الميكانيكا الكمومية والنسبية في بدايتها المبكرة، وهذه التبعات ستحمل مفاجآت رائعة: بنية نواة الذرة، والطاقة النووية، والثقوب السوداء وتبخرها، والميوعة الفائقة، والتوصيلية الفائقة، والترانزستورات، والليزر، والتصوير بالرنين المغناطيسي، وهذه كانت مجرد أمثلة ولا سبيل للحصر. ولاندau، على الرغم من تشاؤمه، سيصبح شخصية محورية في السعي لاكتشاف هذه التبعات.

عند عودته إلى لينينجراد في عام 1931، قرر لاندau -الذي كان ماركسيًا ووطنياً متحمسًا- تكريس حياته المهنية لنقل الفيزياء النظرية الحديثة إلى الاتحاد السوفيتي. وقد نجح نجاحًا هائلًا، كما سنرى في الفصول اللاحقة.

بعد فترة وجيزة من عودة لاندau، أُسدل الستار الحديدي لستالين، مما جعل السفر إلى الغرب شبه مستحيل. وكما ذكر جورج جامو، زميل لاندau في لينينجراد، في وقت لاحق: «لقد أصبح العلم الروسي الآن أحد أسلحة محاربة العالم الرأسمالي. وكما كان هتلر يقسم العلوم والفنون إلى معسكرين يهودي وآري، ابتكر ستالين فكرة العلم الرأسمالي

والبروليتاري. لقد [أصبح] بمثابة جريمة للعلماء الروس أن «يتآخوا» مع علماء البلدان الرأسمالية.

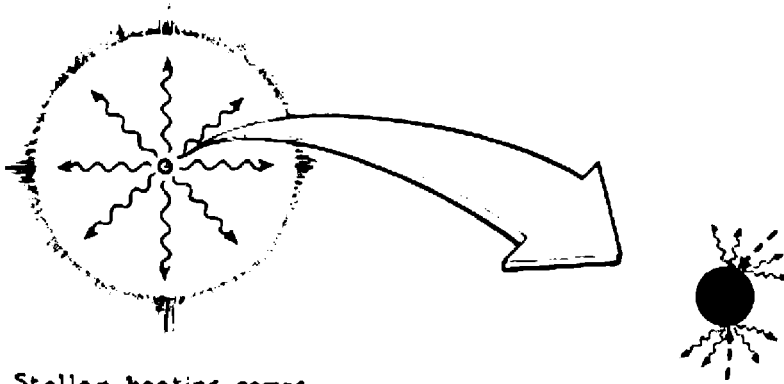
تحول المناخ السياسي من سيئ إلى فظيع. في عام 1936، بعد أن قتل ستالين ما بين ستة أو سبعة ملايين من الفلاحين والكولاك (ملاك الأراضي) في إطار مشروعه الجماعي القسري للزراعة، شرع ستالين في عملية تطهير استمرت عدة سنوات للقيادات السياسية والفكرية في البلاد، وهي عملية التطهير التي يطلق عليها الآن «الرعب الأعظم». تضمنت عملية التطهير إعدام جميع أعضاء المكتب السياسي الأصلي للينين تقريبًا، وإعدام أو اختفاء قسري لكبار قادة الجيش السوفييتي، لن يرى أحد مرة أخرى خمسين من أصل واحد وسبعين عضوًا في اللجنة المركزية للحزب الشيوعي، وكذلك معظم السفراء لدى الدول الأجنبية ورؤساء الوزراء وكبار المسؤولين في الجمهوريات السوفيتية غير الروسية. وفي المستويات الأدنى، اعتُقل وسُجن ما يقرب من 7 ملايين شخص وتوفي 2.5 مليون شخص، نصفهم من المثقفين، بما في ذلك عدد كبير من العلماء وبعض فرق البحث بأكملها. لقد دُمّرت البيولوجيا السوفيتية وعلم الوراثة والعلوم الزراعية.

في أواخر عام 1937، شعر لاندau، الذي أصبح الآن قائدًا لأبحاث الفيزياء النظرية في موسكو، بحرارة التطهير تقترب منه. في حالة من الذعر بحث عن الحماية. وقد تكون إحدى الحمایات الممكنة هي تركيز الاهتمام العام عليه باعتباره عالمًا بارزًا، فبحث بين أفكاره العلمية عن فكرة قد تحدث ضجة كبيرة في الغرب والشرق على حد سواء. كان اختياره عبارة عن فكرة فكر فيها منذ أوائل ثلاثينيات القرن العشرين: فكرة أن النجوم «الطبيعية» مثل الشمس، قد تمتلك نجومًا نيوترونية في مراكزها، وهو ما أطلق عليه لاندau القلب النيوتروني.

كان السبب وراء فكرة لاندau هو التالي: إن الشمس والنجوم العادية الأخرى تدعم ذاتها ضد أن تسحقها جاذبيتها عن طريق الضغط الحراري (الناجم عن الحرارة). تشع الشمس الحرارة والضوء في الفضاء، ولا بد أنها ستبرد وتنكمش وتموت في غضون 30 مليون سنة تقريبًا، ما لم تكن لديها طريقة ما لتجديد الحرارة التي تفقدها. وبما أن هناك أدلة جيولوجية دامغة، ظهرت في عشرينيات وثلاثينيات القرن الماضي، تدل على أن الأرض ظلت في درجة حرارة ثابتة تقريبًا لمدة مليار سنة أو أكثر، فلا بد أن الشمس تجدد حرارتها بطريقة ما. اقترح آرثر إدينجتون وآخرون (بشكل صحيح) في عشرينيات القرن الماضي

أن الحرارة الجديدة قد تأتي من التفاعلات النووية، حيث يتحول نوع ما من الأنوية الذرية إلى نوع آخر - وهو ما يسمى الآن بالحرق النووي أو الاندماج النووي؛ انظر الإطار 5.3. ومع ذلك، فإن تفاصيل هذا الحرق النووي لم تكن قد وُضعت بشكل كافٍ بحلول عام 1937 كي يتمكن الفيزيائيون من معرفة ما إذا كان بإمكانه (أي الحرق النووي) القيام بهذه المهمة. نستطيع هنا أن نقول إن قلب لاندائو النيوتروني قد قدّم بديلاً جذاباً.

تماماً كما استطاع زفيكي أن يتخيل تزويد المستعر الأعظم بالطاقة من خلال الطاقة المنطلقة عندما ينفجر نجم عادي ليشكّل نجماً نيوترونياً، كذلك تمكن لاندائو من أن يتخيل أن الشمس والنجوم العادية الأخرى تزود بالطاقة من خلال الطاقة المحررة الناتجة من التقاط القلب النيوتروني لذراتها، واحدة تلو الأخرى. (الشكل 5.4).



Stellar heating comes from superdense neutron core.

Heat is released when normal atoms (thick dashed arrows) are captured by neutron core.

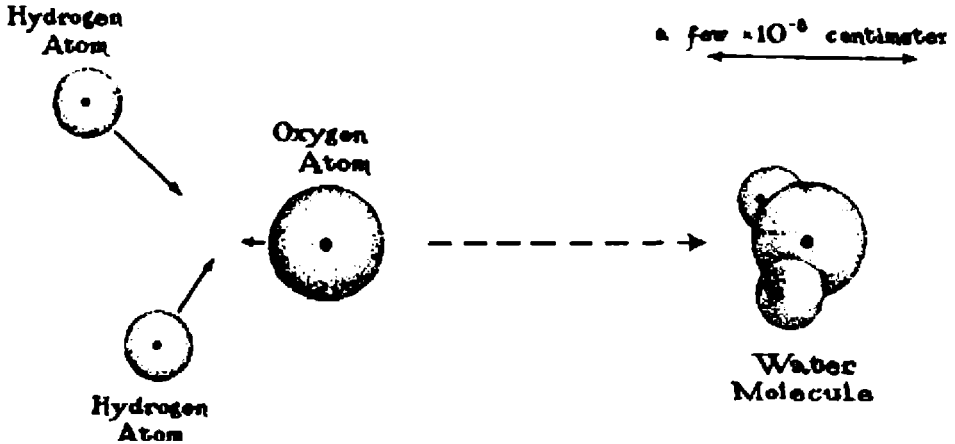
5.4 تكهنات ليف لاندائو حول أصل الطاقة التي تحافظ على سخونة النجم العادي.

5.3 الاطار

الحرق النووي (الاندماج) الذي يتناقض مع الحرق العادي

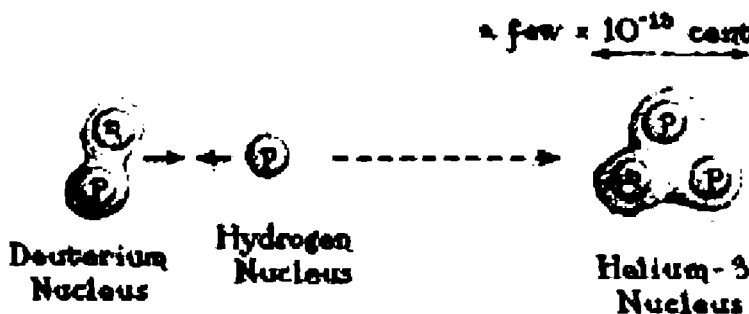
الاحتراق العادي هو تفاعل كيميائي. في التفاعلات الكيميائية، تتحد الذرات لتشكل جزيئات، حيث تتشارك سحبها الإلكترونية بعضها مع بعض؛ السحب الإلكترونية تحمل الجزيئات معًا. الاحتراق النووي هو تفاعل نووي. في الحرق النووي، تندمج الأنوية الذرية معًا (الاندماج النووي) لتكوين أنوية ذرية أكثر ضخامة؛ تجمع القوة النووية تلك الأنوية الأكثر ضخامة معًا.

يوضح الرسم التوضيحي التالي مثالاً على الحرق العادي: حرق الهيدروجين لإنتاج الماء (شكل قوي من أشكال الحرق يُستخدم لتشغيل بعض الصواريخ التي ترفع الحمولات إلى الفضاء). تتحد ذرتا هيدروجين مع ذرة أكسجين لتكوين جزيء الماء. في جزيء الماء، تتشارك ذرات الهيدروجين والأكسجين سحبها الإلكترونية بعضها مع بعض، لكنها لا تتشارك في الأنوية الذرية.



يوضح الرسم البياني التالي مثالاً على الاحتراق النووي: اندماج نواة الديوتيريوم («الهيدروجين الثقيل») ونواة هيدروجين عادية لتكوين نواة الهيليوم - 3. وهذا أحد تفاعلات الاندماج المعروف حالياً أنها تزود الشمس والنجوم الأخرى بالطاقة، والتي تزود القنابل الهيدروجينية بالطاقة (الفصل السادس). تحتوي نواة الديوتيريوم على نيوترون واحد وبروتون واحد، مرتبطين معاً بالقوة النووية؛ تتكون نواة الهيدروجين من بروتون واحد؛

تحتوي نواة الهيليوم - 3 الناتجة عن الاندماج على نيوترون واحد واثنين من البروتونات.



إن التقاط قلب نيوتروني لذرة يشبه إلى حد كبير إسقاط صخرة على لوح أسمنتي من ارتفاع كبير: تسحب الجاذبية الصخرة إلى الأسفل، وتزيد من تسارعها حتى تصل إلى سرعة عالية، وعندما تصطدم باللوح، تنطلق طاقتها الحركية الضخمة (الطاقة الناتجة عن الحركة) والتي بإمكانها أن تحطم اللوح إلى ألف قطعة. وبالمثل، فإن الجاذبية فوق القلب النيوتروني يجب أن تعمل على تسريع الذرات الساقطة إلى سرعات عالية جداً، كما قال لاندau. وعندما تهبط ذرة كهذه إلى القلب، فإن تحطم هذه الذرة يوقف تحول طاقتها الحركية الضخمة إلى حرارة (كمية تعادل 10 بالمائة من كتلتها). في هذا السيناريو، المصدر النهائي لحرارة الشمس هو الجاذبية الشديدة لنواتها النيوترونية؛ وكما هي الحال لمستعرات زفيكي العظمى، فإن جاذبية النواة فعالة بنسبة 10 ٪ في تحويل كتلة الذرات الساقطة إلى حرارة.

إن حرق الوقود النووي (الإطار 5.3)، على التقيض من احتجاز الذرات في قلب النيوترون (الشكل 5.4)، يمكن أن يحول فقط بضعة أعشار من 1 ٪ من كتلة الوقود إلى حرارة. بمعنى آخر، كان مصدر الحرارة عند إدينجتون (الطاقة النووية) أقل قوة بنحو 30 مرة من مصدر الحرارة عند لاندau (طاقة الجاذبية) 5.

كان لاندau قد طوّر بالفعل نسخة أكثر بدائية من فكرته عن القلب النيوتروني في عام 1931. ومع ذلك، لم يكن النيوترون قد اكتُشف بعد في ذلك الوقت وكانت الأنوية الذرية لغزاً، لذا فإن التقاط الذرات في النواة في نموذج في عام 1931 قد أطلق طاقة من خلال عملية تأملية تماماً، مبنية على شك (غير صحيح) في أن قوانين الميكانيكا الكمومية قد تفشل في تفسير الأنوية الذرية. والآن بعد أن أصبح النيوترون معروفاً منذ خمس سنوات

وبدأ فهم خصائص الأنوية الذرية، أصبح لاندau قادرًا على جعل فكرته أكثر دقة وإقناعًا. فمن خلال تقديمه الفكرة للعالم مع قدر كبير من الدعاية، فربما يخفف ذلك من حرارة حملة التطهير التي قام بها ستالين.

في أواخر عام 1937، كتب لاندau مخطوطة تصف فكرته حول القلب النيوتروني؛ للتأكد من حصوله على أقصى قدر من الاهتمام العام، اتخذ سلسلة من الخطوات غير العادية: قدمها للنشر باللغة الروسية في Doklady Akademii Nauk (تقارير أكاديمية العلوم في اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية، المنشورة في موسكو)، وبالتوازي مع ذلك، أرسل بالبريد نسخة باللغة الإنجليزية إلى نفس الفيزيائي الغربي الشهير الذي لجأ إليه تشاندراسخار، عندما هاجمه إدينجتون (الفصل الرابع)، وهو نيلز بور في كوبنهاجن. (كان بور، بصفته عضوًا فخريًا في أكاديمية العلوم في جمهورية روسيا الاتحادية الاشتراكية السوفيتية، مقبولًا إلى حد ما لدى السلطات السوفيتية حتى في أثناء فترة الرعب العظيم). ومع مخطوطته، أرسل لاندau إلى بور الرسالة التالية:

عزيزي السيد بور!

أرفق مقالًا كنت قد كتبتَه عن الطاقة النجمية. إذا كان الأمر منطقيًا بالنسبة إليك من وجهة نظر فيزيائية، أسألك أن تقدمه إلى دورية نيتشر. إذا لم أسبب لك الكثير من الإزعاج، فسأكون سعيدًا جدًا إذا أبلغتني برأيك في هذا العمل.

مع خالص الشكر.

المخلص ل. لاندau

(نيتشر Nature «وتعني الطبيعة» هي مجلة علمية بريطانية تنشر، بسرعة، إعلانات الاكتشافات في جميع مجالات العلوم، وتتمتع بواحدة من أعلى معدلات التوزيع في جميع أنحاء العالم بين المجلات العلمية الجادة).

كان لدى لاندau أصدقاء في مناصب رفيعة بما يكفي لترتيب ذلك، بمجرد تلقي نبأ موافقة بور على مقاله وتقديمه إلى دورية نيتشر، سترسل برقية إلى بور من قبل هيئة تحرير إزفستيا Izvestia. (كانت إزفستيا واحدة من الصحيفتين الأكثر تأثيرًا في اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية، وهي صحيفة تديرها الحكومة السوفيتية ونيابة عنها). وخرجت البرقية في 16 نوفمبر 1937 قائلة:

أخبرنا من فضلك برأيك في عمل البروفيسور لاندau. أرسل لنا تلجرافًا، من فضلك، مصحوبًا باستنتاجك الموجز.

طاقم المحررين، إزفستيا

ومن الواضح أن بور كان في حيرة وقلق بعض الشيء من الطلب، فأجاب من كوينهاجن في نفس اليوم:

إن الفكرة الجديدة للبروفيسور لاندau حول القلب النيوتروني للنجوم الضخمة هي على أعلى مستوى من التميز وتبدو واعدة تمامًا. فيسعدني أن أرسل تقييمًا قصيرًا عنها وعن العديد من الأبحاث الأخرى التي أجراها لاندau. أرجو أن تبلغني بشكل أكثر دقة، لأي غرض مطلوب رأيي.

بور

ورد موظفو إزفستيا بأنهم يريدون نشر تقييم بور في صحيفتهم. ولقد فعلوا ذلك بالضبط في 23 نوفمبر، في مقال وصف فكرة لاندau وأشاد بها بشدة:

لقد أثار هذا العمل الذي قام به البروفيسور لاندau اهتمامًا كبيرًا بين الفيزيائيين السوفييت، وفكرته الجريئة تعطي حياة جديدة لواحدة من أهم العمليات في الفيزياء الفلكية. هناك كل الأسباب للاعتقاد بأن فرضية لاندau الجديدة سوف يتضح أنها صحيحة وستؤدي إلى حلول لسلسلة كاملة من المشكلات التي لم تحل في الفيزياء الفلكية... قدم نيلز بور تقييمًا كله إطراء بالغ على عمل هذا العالم السوفييتي [لاندau]، قائلاً إن «الفكرة الجديدة للاندau ممتازة وواعدة جدًا».

لم تكن هذه الحملة كافية لإنقاذ لاندau. في وقت مبكر من صباح يوم 28 أبريل 1938، طُرق باب شقته، ونُقل في سيارة ليموزين سوداء رسمية في حين كانت زوجته كورا تراقب من باب الشقة في حالة صدمة. المصير الذي حل بالعديد من الذين طالتهم حملة التطهير، أصبح الآن مصير لاندau أيضًا.

أخذت سيارة الليموزين لاندau إلى أحد أسوأ السجون السياسية في موسكو، بوتيرسكايا Butyrskaya. وهناك قيل له إن أنشطته قد اكتُشفت كجاسوس ألماني، وعليه أن يدفع ثمنها. كانت الاتهامات سخيفة (لاندau، يهودي وماركسي متحمس يتجسس لصالح ألمانيا النازية؟)، ولم يكن لها أي صلة بالموضوع. كانت الاتهامات سخيفة دائمًا تقريبًا. في روسيا ستالين، نادرًا ما كان المرء يعرف السبب الحقيقي وراء سجن شخص.

ما -رغم أنه في حالة لاندau، هناك دلائل في ملفات KGB التي كُشف عنها مؤخرًا: في محادثات مع زملائه، انتقد الحزب الشيوعي والحكومة السوفييتية لأسلوبهما في تنظيم البحث العلمي. وللاعتقالات الجماعية في الفترة من 1936 إلى 1937 والتي كانت بمثابة بداية الرعب العظيم. كان يُنظر إلى مثل هذه الانتقادات على أنها «نشاط مناهض للسوفييت» ويمكن أن تؤدي بسهولة إلى السجن.

كان لاندau محظوظًا. ولم يستمر سجنه إلا سنة واحدة، ولم ينج منه إلا بالكاد. لقد أطلق سراحه في أبريل 1939 بعد أن ناشد بيوتر كاييتسا -أشهر عالم سوفييتي في الفيزياء التجريبية خلال الثلاثينيات- مباشرة مولوتوف وستالين للسماح له بالخروج على أساس أن لاندau ولاندau فقط، من بين جميع الفيزيائيين النظريين السوفييت، لديه القدرة على حل المشكلة. وهو لغز كيفية حدوث الميوعة الفائقة⁶. (لقد اكتشفت الميوعة الفائقة في مختبر كاييتسا، وبشكل مستقل من قبل جون ف. ألين وأ. دون ميسنر في كامبريدج، إنجلترا، وإذا تمكن عالم سوفييتي من تفسيرها، فإن هذا من شأنه أن يثبت للعالم بشكل مضاعف قوة العلوم السوفييتية).

خرج لاندau من السجن هزلاً ومريضاً للغاية. وفي الوقت المناسب، تعافى جسدياً وعقلياً، وحل لغز الميوعة الفائقة باستخدام قوانين الميكانيكا الكمومية، وحصل على جائزة نوبل بسبب الحل الذي قدمه. لكن روحه تحطمت. ولم يتمكن مرة أخرى من تحمل حتى الضغط النفسي البسيط للسلطات السياسية.

أوبنهايمر

في كاليفورنيا، اعتاد روبرت أوبنهايمر على القراءة المدققة لكل مقال علمي ينشره لاندau. وهكذا، جذب مقال لاندau عن القلب النيوتروني في عدد 19 فبراير 1938 من دورية نيتشر اهتمامه الفوري. لما كانت الفكرة لفريتز زفيكي، كان النجم النيوتروني كفكرة تنشيطية للمستعرات العظمى -من وجهة نظر أوبنهايمر- مجرد تكهنات بعيدة المنال وغير مستقرة. أما وقد أصبحت فكرة ليف لاندau، فقد أصبح القلب النيوتروني كفكرة منشطة لنجم عادي تستحق التفكير الجاد. هل يمكن أن تمتلك الشمس بالفعل مثل هذا القلب؟ تعهد أوبنهايمر بمعرفة ذلك.

كان أسلوب بحث أوبنهايمر مختلفًا تمامًا عن أي أسلوب تعرضت له حتى الآن في هذا الكتاب. في حين عمل بادي وزفيكي معًا كزميلين متساويين حيث كانت مواهبهما ومعارفهما بعضهما يكمل بعضًا، وكان كل من تشاندراسخار وأينشتاين يعملان بمفردهما، كان أوبنهايمر يعمل بحماس وسط حاشية كبيرة من الطلاب. في حين عانى أينشتاين عندما طُلب منه التدريس، ازدهر أوبنهايمر في التدريس.

مثل لاندאו، ذهب أوبنهايمر إلى أوروبا الغربية - موطن الفيزياء النظرية - للتعلم؛ ومثل لاندאו، أطلق أوبنهايمر، عند عودته إلى وطنه، عملية نقل للفيزياء النظرية من أوروبا إلى موطنه الأصلي.

لما حان وقت عودته إلى أمريكا، كان أوبنهايمر قد اكتسب سمعة هائلة لدرجة أنه تلقى عروضًا لوظائف أعضاء هيئة التدريس من عشر جامعات أمريكية، بما في ذلك جامعة هارفارد وكالتيك، ومن اثنتين في أوروبا. ومن بين العروض كان عرضًا من جامعة كاليفورنيا في بيركلي، التي لم يكن لديها فيزياء نظرية على الإطلاق. يتذكر أوبنهايمر لاحقًا قائلاً: «لقد زرت بيركلي، واعتقدت أنني أرغب في الذهاب إليها لأنها كانت صحراء». وفي بيركلي كان بإمكانه أن يخلق شيئًا خاصًا به تمامًا. ومع ذلك، خوفًا من عواقب العزلة الفكرية، قبل أوبنهايمر عرض بيركلي وعرض معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا. كان يقضي فصلي الخريف والشتاء في بيركلي، والربيع في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا. «لقد احتفظت بالاتصال مع معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا. إنه المكان الذي أود العودة إليه إذ ابتعد كثيرًا عن القاعدة، وحيث يمكنني أن أتعلم أشياء قد لا تظهر بشكل كافٍ في المقالات المنشورة».

في البداية، كان أوبنهايمر، كمعلم، سريعًا جدًا، وغير صبور بالمرة، ومنغطرسًا جدًا مع طلابه. لم يكن يدرك مدى ضآلة ما يعرفونه؛ لم يستطع أن ينزل بنفسه إلى مستواهم. كانت محاضراته الأولى في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا في ربيع عام 1930 بمثابة جولة قوية، قوية وأنيقة وثاقبة. عندما انتهت المحاضرة وخلت الغرفة، بقي ريتشارد تولمان، الكيميائي الذي تحول إلى فيزيائي والذي أصبح الآن صديقًا مقربًا منه، في الخلف لإعادته إلى أرض الواقع: «حسنًا، روبرت؛ لقد كان ذلك جميلًا ولكنني لم أفهم ولا حتى كلمة لعينة».

ومع ذلك، تعلم أوبنهايمر بسرعة. وخلال عام، بدأ طلاب الدراسات العليا وطلاب ما بعد الدكتوراه يتدفقون إلى بيركلي من جميع أنحاء أمريكا لتعلم الفيزياء منه، وخلال عدة سنوات جعل بيركلي مكانًا جذابًا أكثر من أوروبا للطلاب الأمريكيين في مرحلة ما بعد الدكتوراه في الفيزياء النظرية.

وصف روبرت سيربر، أحد باحثي ما بعد الدكتوراه في أوبنهايمر، كيف كان العمل معه: «كان أوبي (كما كان معروفًا لدى طلابه في بيركلي) سريعًا، وغير صبور، وله لسان حاد، وفي الأيام الأولى من تدريسه اشتهر بإرهاب الطلاب. ولكن بعد خمس سنوات من الخبرة أصبح أكثر نضجًا (إذا صدقنا طلابه الأوائل). كانت دورته [في الميكانيكا الكمومية] بمثابة إنجاز تعليمي ملهم. لقد نقل إلى طلابه إحساسًا بجمال البنية المنطقية للفيزياء والإثارة حول تطور الفيزياء. استمع الجميع تقريبًا إلى الدورة التدريبية أكثر من مرة، وكان أوبي يواجه أحيانًا صعوبة في ثني الطلاب عن الحضور للمرة الثالثة أو الرابعة.

«كانت طريقة أوبي في العمل مع طلابه الباحثين مبتكرة أيضًا. تتألف مجموعته من 8 أو 10 طلاب دراسات عليا ونحو ستة زملاء في مرحلة ما بعد الدكتوراه. كان يلتقي بالمجموعة مرة واحدة يوميًا في مكتبه. قبل الوقت المحدد بقليل، يتناثر الأعضاء ويصطفون على الطاولات وحول الجدران. يأتي أوبي وبينما يناقش معهم حالة لمشكلة بحث لأحد الطلاب، يستمع الآخرون ويقدمون تعليقاتهم. وقد تعرض الجميع لمجموعة واسعة من المواضيع. كان أوبنهايمر مهتمًا بكل شيء؛ لقد قدم موضوعًا تلو الآخر وتقاطع مع أفكار الآخرين. وفي فترة ما بعد الظهر قد يناقشون الديناميكا الكهربائية والأشعة الكونية والفيزياء الفلكية والفيزياء النووية».

في كل ربيع، كان أوبنهايمر يجمع الكتب والأوراق في سيارته المكشوفة ويضع العديد من الطلاب في المقعد المتحرك، ويتجه بالسيارة إلى باسادينا. قال سيربر: «لم نفكر في التخلي عن منازلنا أو شققنا في بيركلي، إلا ونحن واثقون بأننا نستطيع العثور على كوخ حديقة في باسادينا مقابل خمسة وعشرين دولارًا شهريًا».

لكل مشكلة تثير اهتمامه، كان أوبنهايمر يختار طالبًا أو باحثًا في مرحلة ما بعد الدكتوراه للعمل على التفاصيل. بالنسبة إلى مشكلة لاندائو، وهي مسألة ما إذا كان القلب النيوتروني قادرًا على إبقاء الشمس ساخنة، فقد اختار سيربر لها.



روبرت سيربر (يسار) وروبرت أوبنهايمر (يمين) يناقشان الفيزياء، كاليفورنيا. 1942.
[إهداء من وكالة المعلومات دي إس].

وسرعان ما أدرك أوبنهايمر وسيربر أنه إذا كان للشمس قلب نيوتروني في مركزها، وإذا كانت كتلة هذا القلب تمثل جزءًا كبيرًا من كتلة الشمس، فإن الجاذبية الشديدة لهذا القلب ستحتفظ بالطبقات الخارجية للشمس في قبضة محكمة، مما يجعل محيط الشمس أصغر بكثير مما هو عليه في الواقع. وبالتالي، فإن فكرة لاندאו حول القلب النيوتروني لا

يمكن أن تنجح إلا إذا كان القلب النيوتروني أقل كتلة بكثير من الشمس.

«ما مدى صغر كتلة القلب النيوتروني؟»، هكذا كان أوبنهايمر وسيربر مدفوعين لطرح الأسئلة على نفسيهما. «ما الحد الأدنى من الكتلة الممكنة للقلب النيوتروني؟»، لاحظ أن هذا السؤال هو المعكس للسؤال الحاسم عن وجود الثقوب السوداء؛ لمعرفة ما إذا كانت الثقوب السوداء يمكن أن تتشكل، يحتاج المرء إلى معرفة أقصى كتلة ممكنة لنجم نيوتروني (الشكل 5.3 العلوي). لم يكن لدى أوبنهايمر حتى الآن أي فكرة عن أهمية مسألة الكتلة القصوى، لكنه عرف الآن أن الحد الأدنى من كتلة القلب النيوتروني أصبح محوريًا في فكرة لاندau.

في مقاله، استخدم لاندau -الذي كان مدركًا أيضًا لأهمية الحد الأدنى لكتلة القلب النيوتروني- قوانين الفيزياء لحسابها. وبعناية فحص أوبنهايمر وسيربر حسابات لاندau. نعم، لقد وجدوا أن لاندau قد أخذ في الاعتبار بشكل صحيح قوى الجاذبية داخل وبالقرب من القلب. ونعم، لقد أخذ في الاعتبار بشكل صحيح ضغط انتكاس نيوترونات النواة (الضغط الناتج عن حركات النيوترونات الخائفة عندما تنضغط في خلايا صغيرة). لكن لا، لم يأخذ في الاعتبار القوة النووية التي تؤثر بها النيوترونات بعضها على بعض. ولم تكن تلك القوة مفهومة بالكامل بعد. ومع ذلك، فقد كان مفهومًا بما فيه الكفاية لأوبنهايمر وسيربر كي يستنتجا أنه من المحتمل -ليس بشكل قطعي- ولكن من المحتمل، أنه لا يوجد قلب نيوتروني يمكن أن يكون أقل من $1/10$ من كتلة الشمس. إذا نجحت الطبيعة في خلق قلب نيوتروني أخف من هذا، فإن جاذبيتها ستكون أضعف من أن تحافظ على تماسكها؛ وسيستسبب ضغطها في الانفجار (خارجيًا).

للوهلة الأولى، لم يُستبعد امتلاك الشمس لقلب نيوتروني؛ بعد كل شيء، فإن القلب ذا الكتلة الشمسية $1/10$ ، والتي سمحت بها تقديرات أوبنهايمر وسيربر، قد يكون صغيرًا بما يكفي للاختباء داخل الشمس من دون التأثير على خصائص سطحها كثيرًا (من دون التأثير على الأشياء التي نراها). لكن المزيد من الحسابات، التي وازنت بين سحب جاذبية القلب مقابل ضغط الغاز المحيط، أظهرت أن تأثيرات القلب لا يمكن إخفاؤها: حول القلب سيكون هناك غلاف من نوع مادة القزم الأبيض والتي تزن نحو كتلة شمسية كاملة،

ومع وجود كمية ضئيلة فقط من الغاز التقليدي خارج تلك القشرة، لا يمكن للشمس أن تبدو على الإطلاق كما نراها. وبالتالي، لا يمكن للشمس أن تمتلك قلبًا نيوترونيًا، وأن الطاقة اللازمة لإبقاء الشمس ساخنة يجب أن تأتي من مكان آخر.

من أين؟ في نفس الوقت الذي كان فيه أوبنهايمر وسيربر في بيركلي يقومان بهذه الحسابات، كان هانز بيث من جامعة كورنيل في إيثاكا، نيويورك، وتشارلز كريتشفيلد من جامعة جورج واشنطن في واشنطن العاصمة، يستخدمان قوانين الفيزياء النووية المطورة حديثًا لإثبات ذلك. يوضح بالتفصيل أن الاحتراق النووي (اندماج الأنوية الذرية؛ الإطار 5.3) يمكن أن يُبقي الشمس والنجوم الأخرى ساخنة. كان إدينجتون على حق، وكان لاندאו على خطأ، على الأقل بالنسبة إلى الشمس ومعظم النجوم الأخرى. (اعتبارًا من أوائل التسعينيات، يبدو أن عددًا قليلًا من النجوم العملاقة قد يستخدم في الواقع آلية لانداو).

لم يكن لدى أوبنهايمر وسيربر أي فكرة عن أن ورقة لانداو كانت محاولة يائسة لتجنب السجن والموت المحتمل، لذلك في 1 سبتمبر 1938، بينما كان لانداو يقبع في سجن بوتيرسكايا، قدما نقدهما إلى مجلة المراجعات الفيزيائية *Physical Review*. وبما أن لانداو كان فيزيائيًا عظيمًا بما يكفي لتحمل النقد، فقد قال بصراحة تامة: «تقدير لانداو... أدى إلى قيمة مقدارها 0.001 من الكتلة الشمسية لقيمة حد كتلة [القلب النيوتروني]. يبدو أن هذا الرقم خاطئ... إن [القوى النووية] -من نوع التبادل المغزلي المفترض- غالبًا ما تمنع وجود قلب [نيوتروني] للنجوم ذات الكتل المماثلة لكتلة الشمس».

القلب النيوتروني عند لانداو والنجوم النيوترونية عند زفيكي هما في الواقع نفس الشيء. القلب النيوتروني ليس سوى نجم نيوتروني يجد نفسه -بطريقة ما- داخل نجم عادي. لا بد أن هذا كان واضحًا لأوبنهايمر، والآن بعد أن بدأ بالتفكير في النجوم النيوترونية، انجذب بلا هوادة إلى القضية التي كان ينبغي على زفيكي أن يعالجها لكنه لم يستطع: ما، على وجه التحديد، مصير النجوم الضخمة عندما تستنفد طاقتها؟ الوقود النووي الذي -بحسب بيث وكريتشفيلد- يبقوها ساخنة؟ ما الجثث التي سيخلفها موتها: هل هي الأقزام البيضاء، أم النجوم النيوترونية، أم الثقوب السوداء، أم شيء آخر؟

أظهرت حسابات تشاندراسخار بشكل بَيِّن أن النجوم ذات الكتلة الأقل من 1.4

شمس يجب أن تصبح أقرامًا بيضاء. كان زفيكي يتكهن بصوت عالٍ بأن بعض النجوم الأكبر من 1.4 شمس على الأقل سوف تنفجر لتشكل نجومًا نيوترونية، وتولد في هذه العملية مستعرات عظمية. هل يمكن أن يكون زفيكي على حق؟ وهل ستموت كل النجوم الضخمة بهذه الطريقة، وبالتالي يُنقذ الكون من الثقوب السوداء؟

كانت موهبته العظيمة وإحدى نقاط قوة أوبنهايمر كعالم في الفيزياء النظرية هي قدرته التي لا تخطئ على النظر في مشكلة معقدة والتخلص من التعقيدات حتى يصل إلى القضية المركزية التي تسيطر عليها. وبعد عدة سنوات، ساهمت هذه الموهبة في تألق أوبنهايمر كفائد لمشروع القنبلة الذرية الأمريكية. في هذا الوقت، في أثناء كفاحه لفهم موت النجوم، أرشدته موهبته إلى أن يتجاهل كل التعقيدات التي كان زفيكي يروج لها -تفاصيل الانفجار الداخلي للنجم، وتحول المادة العادية إلى مادة نيوترونية، وإطلاق طاقة هائلة وإمكانية إمداد المستعرات العظمية بالطاقة وكذلك الأشعة الكونية. كل هذا لم يكن له أي علاقة بمسألة المصير النهائي للنجم. الشيء الوحيد ذو الصلة هو الكتلة القصوى التي يمكن أن يمتلكها النجم النيوتروني. إذا كانت ضخامة النجوم النيوترونية كبيرة بشكل اعتباطي (المنحنى B في الشكل 5.3 العلوي)، لا يمكن للثقوب السوداء أن تتشكل أبدًا. إذا كان هناك قدر أقصى ممكن من كتلة النجم النيوتروني (المنحنى A في الشكل 5.3)، فإن النجم الأثقل من هذا الحد الأقصى قد يشكل ثقبًا أسود حينما يموت.

بعد أن طرح سؤال الكتلة القصوى بوضوح صارخ، شرع أوبنهايمر في حله بطريقة منهجية جلية -وكما كانت ممارسته المعتادة، تعاون مع أحد الطلاب، في هذه الحالة شاب يدعى جورج فولكوف. سأسرد قصة سعي أوبنهايمر وفولكوف لمعرفة كتل النجوم النيوترونية، والمساهمات المركزية لصديق أوبنهايمر في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، ريتشارد تولمان، في الإطار 5.4. إنها حكاية توضح أسلوب بحث أوبنهايمر والعديد من الاستراتيجيات التي يعمل بها الفيزيائيون، عندما يفهمون بوضوح بعض القوانين التي تحكم الظاهرة التي يدرسونها، ولكن ليس كلها: في هذه الحالة فهم أوبنهايمر قوانين الميكانيكا الكمومية والنسبية العامة، لكنه لم يفهم هو ولا أي شخص آخر القوة النووية جيدًا.

على الرغم من معرفتهما الضعيفة بالقوة النووية، تمكن أوبنهايمر وفولكوف من إثبات بشكل جلي (الإطار 5.4) أن هناك كتلة قصوى للنجوم النيوترونية، وهي تتراوح بين قرابة نصف كتلة شمسية وعدة كتل شمسية.

في نهايات القرن العشرين، وبعد خمسين عامًا من الدراسة الإضافية، أصبحنا نعلم أن أوبنهايمر وفولكوف كانا على حق؛ في الواقع، تمتلك النجوم النيوترونية الحد الأقصى المسموح به من الكتلة، ومن المعروف الآن أنها تتراوح ما بين 1.5 إلى 3 كتلة شمسية، وهو نفس المدى تقريبًا الذي قَدَّرْوه. بالإضافة إلى ذلك، منذ عام 1967، رصد علماء الفلك مئات النجوم النيوترونية، وقيست كتل العديد منها بدقة عالية. الكتل المقيسة كلها قريبة من 1.4 شمس؛ لماذا؟ لا نعرف.

5.4 الإطار

حكاية أوبنهايمر وفولكوف وتولمان: البحث عن كتل النجوم النيوترونية

عند الشروع في تحليل معقد، فمن المفيد أن يتعرف المرء على اتجاهاته من خلال البدء بحساب تقريبي «مرتّب من حيث الحجم»، وهو حساب دقيق فقط في حدود معامل 10، على سبيل المثال، وتماشياً مع هذه القاعدة الأساسية، بدأ أوبنهايمر بحثه في مسألة إذا كان يمكن للنجوم النيوترونية أن تمتلك كتلة قصوى من خلال عملية حسابية أولية، لا تتجاوز بضع صفحات. وكانت النتيجة مثيرة للاهتمام: فقد وجد كتلة قصوى تبلغ 6 شمس لأي نجم نيوتروني. إذا أعطت الحسابات التفصيلية نفس النتيجة، يمكن لأوبنهايمر أن يستنتج أن الثقوب السوداء قد تتشكل عندما تموت النجوم الأثقل من كتلة قدرها 6 شمس.

«الحساب التفصيلي» يعني اختيار كتلة لنجم نيوتروني افتراضي، ثم التساؤل عما إذا كان الضغط النيوتروني داخل النجم، بالنسبة إلى هذه الكتلة، يمكن أن يوازن الجاذبية. إذا أمكن تحقيق التوازن، فمن الممكن أن تمتلك النجوم النيوترونية تلك الكتلة. وسيكون الضروري اختيار كتلة تلو الأخرى، ولكل كتلة سنسأل عن التوازن بين الضغط والجاذبية. هذا المشروع أصعب مما قد يبدو، لأن الضغط والجاذبية يجب أن يوازن أحدهما الآخر في كل مكان داخل النجم. ومع ذلك، فقد كان هذا مشروعاً سبق أن اتبعه تشاندراسخار من قبل، في تحليله للأقزام البيضاء (لقد أجري التحليل باستخدام حاسبة براونشفايجر الخاصة بآرثر إدينجتون، حيث كان إدينجتون ينظر من فوق كتف تشاندراسخار؛ الفصل الرابع).

تمكن أوبنهايمر من تصميم حساباته للنجوم النيوترونية وفقاً لحسابات تشاندراسخار عن القزم الأبيض، ولكن بعد إجراء تغييرين حاسمين: أولاً، في القزم الأبيض، ينتج

الضغط ع طريق الإلكترونات، وفي النجم النيوتروني عن طريق النيوترونات، وبالتالي فإن معادلة الحالة (العلاقة بين الضغط والكثافة) ستكون مختلفة. ثانيًا، في القزم الأبيض، تكون الجاذبية ضعيفة بدرجة كافية بحيث يمكن وصفها بشكل متساوٍ من خلال قوانين نيوتن أو النسبية العامة لأينشتاين؛ سيعطي الوصفان نفس التنبؤات تقريبًا، لذلك اختار تشاندراسخار الوصف الأبسط، وهو وصف نيوتن. على النقيض من ذلك، في النجم النيوتروني، بمحيطه الأصغر بكثير، تكون الجاذبية قوية جدًا لدرجة أن استخدام قوانين نيوتن قد يسبب أخطاء جسيمة، لذلك سيتعين على أوبنهايمر وصف الجاذبية بقوانين النسبية العامة لأينشتاين^(*). وبصرف النظر عن هذين التغيرين، هناك معادلة جديدة للحالة (ضغط النيوترون بدلاً من الإلكترون) والوصف الجديد للجاذبية (وصف أينشتاين بدلاً من وصف نيوتن) - ستكون حسابات أوبنهايمر هي نفس حسابات تشاندراسخار.

بعد أن وصل إلى هذا الحد، كان أوبنهايمر مستعدًا لتسليم تفاصيل العملية الحسابية إلى أحد الطلاب. واختار جورج فولكوف، وهو شاب من فانكوفر كان قد هاجر من روسيا عام 1924.

شرح أوبنهايمر المشكلة لفولكوف وأخبره أن الوصف الرياضي للجاذبية الذي سيحتاج إليه موجود في مرجع كتبه ريتشارد تولمان، النسبية والديناميكا الحرارية وعلم الكونيات. ومع ذلك، كانت معادلة الحالة لضغط النيوترونات مسألة أكثر صعوبة، لأن الضغط سيتأثر بالقوة النووية (التي تدفع بها النيوترونات وتسحب بعضها بعضًا). على الرغم من أن القوة النووية أصبحت مفهومة جيدًا في الكثافات داخل الأنوية الذرية، فإنها لم تكن مفهومة جيدًا عند الكثافات الأعلى بعشر مرات التي قد تواجهها النيوترونات في أعماق نجم نيوتروني ضخم. ولم يعرف الفيزيائيون حتى ما إذا كانت القوة النووية تجاذبية عند هذه الكثافات أم تنافرية (سواء كانت النيوترونات تسحب أو تدفع بعضها بعضًا)، وبالتالي لم تكن هناك وسيلة لمعرفة ما إذا كانت القوة النووية قد خفضت ضغط النيوترونات أم زادت. لكن كان لدى أوبنهايمر استراتيجية للتعامل مع هذه الأمور المجهولة.

سيظهر في البداية بأن القوة النووية غير موجودة، هكذا اقترح أوبنهايمر على فولكوف. عندها سيكون الضغط كله من النوع الذي نعرفه جيدًا؛ وهو ضغط انتكاس النيوترونات

(*) انظر المناقشة في القسم الأخير من الفصل الأول (طبيعة القانون الفيزيائي) حول العلاقة بين الأوصاف المختلفة لقوانين الفيزياء ومجالات صلاحيتها.

(الضغط الناتج عن حركات النيوترونات «المختنقة»). وازن ضغط الانتكاس النيوتروني هذا مع الجاذبية، ومن هذا التوازن، سيصبح من السهل حساب الهياكل والكتل التي قد تمتلكها النجوم النيوترونية في كون من دون أي قوة نووية. ثم بعد ذلك، حاول تقدير كيف ستتغير هياكل النجوم وكتلتها إذا تصرفت القوة النووية في كوننا الحقيقي بهذه الطريقة أو تلك أو بطريقة أخرى.

مع مثل هذه التعليمات المعدة جيدًا، كان من الصعب تجاهلها. استغرق الأمر بضعة أيام فقط حتى تمكن فولكوف، مسترشدًا بالمناقشات اليومية مع أوبنهايمر وكتاب تولمان، من استخلاص الوصف النسبي العام للجاذبية داخل النجم النيوتروني. واستغرق الأمر بضعة أيام فقط حتى تمكن من ترجمة معادلة الحالة المعروفة لضغط الإلكترون المتكس إلى معادلة ضغط النيوترونات المتكسدة. ومن خلال موازنة الضغط مع الجاذبية، حصل فولكوف على معادلة تفاضلية معقدة سيخبره حلها بالبنية الداخلية للنجم. ثم كان في وضع حرج. حاول فولكوف قدر المستطاع، ولم يتمكن من حل معادلاته التفاضلية للحصول على صيغة لبنية النجم، لذلك، مثل تشاندراسخار مع الأقزام البيضاء، اضطر إلى حل معادلته عدديًا. تمامًا كما قضى تشاندراسخار عدة أيام في عام 1934 في الضغط على أزرار آلة حاسبة براونشفايجر لإدينجتون لحساب بنية القزم الأبيض المشابهة، فقد عمل فولكوف طوال معظم نوفمبر وديسمبر من عام 1938 في الضغط على أزرار آلة حاسبة من نوع مارشانت.

بينما فولكوف يضغط على الأزرار في بيركلي، كان ريتشارد تولمان في باسادينا يتخذ مسارًا مختلفًا: فقد فضّل بشدة التعبير عن البنية النجمية من خلال الصيغ الرياضية بدلًا من مجرد أرقام على الآلة الحاسبة. يمكن لصيغة واحدة أن تتضمن جميع المعلومات الموجودة في العديد من جداول الأرقام. إذا تمكن من الحصول على الصيغة الصحيحة، فإنها ستحتوي في الوقت نفسه على هياكل النجوم التي تبلغ كتلتها كتلة شمسية واحدة، أو كتلتين شمسيتين، أو 5 كتل شمسية، ما يعني أي كتلة على الإطلاق. ولكن حتى مع مهاراته الرياضية الرائعة، لم يتمكن تولمان من حل معادلة فولكوف باستخدام الصيغ الرياضية.

«من ناحية أخرى»، من المفترض أن يجادل تولمان نفسه، «نحن نعلم أن المعادلة الصحيحة للحالة ليست في الواقع تلك التي يستخدمها فولكوف. لقد تجاهل فولكوف القوة النووية. وبما أننا لا نعرف تفاصيل تلك القوة عند الكثافات العالية، فإننا لا نعرف المعادلة الصحيحة للحالة. لذا اسمحوا لي أن أطرح سؤالًا مختلفًا على فولكوف.

اسمحوا لي أن أسأل كيف تعتمد كتل النجوم النيوترونية على معادلة الحالة. اسمحوا لي أن أظاهر بأن معادلة الحالة «خشنة» للغاية، لدرجة أنها تعطي ضغوطاً عالية بشكل استثنائي، واسمحوا لي أن أسأل ما كتل النجوم النيوترونية في هذه الحالة. ثم اسمحوا لي أن أظاهر بأن معادلة الحالة «ناعمة» للغاية؛ أي أنها تعطي ضغوطاً منخفضة بشكل استثنائي، وأسأل ما كتل النجوم النيوترونية. في كل حالة، سأقوم بتعديل المعادلة الافتراضية للحالة إلى شكل يمكنني من خلاله حل معادلة فولكوف التفاضلية باستخدام الصيغ الرياضية. على الرغم من أن معادلة الحالة التي أستخدمها لن تكون بالتأكيد هي المعادلة الصحيحة، إلا أن حساباتي ستظل تعطيني فكرة عامة عما قد تكون عليه كتل النجوم النيوترونية إذا اختارت الطبيعة معادلة الحالة الصارمة، وما يمكن أن تكون عليه إذا اختارت الطبيعة معادلة الحالة الناعمة.

في 19 أكتوبر، أرسل تولمان خطاباً طويلاً إلى أوبنهايمر يصف فيه بعض الصيغ الرياضية بين-النجمية وكتل النجوم النيوترونية التي اشتقها للعديد من معادلات الحالة الافتراضية. وبعد أسبوع أو نحو ذلك، توجه أوبنهايمر إلى باسادينا لقضاء بضعة أيام في التحدث مع تولمان حول المشروع. في 9 نوفمبر، كتب تولمان لأوبنهايمر رسالة طويلة أخرى، تحتوي على المزيد من الصيغ. في هذه الأثناء، كان فولكوف يضغط على أزرار مارشانت. في أوائل ديسمبر، انتهى فولكوف. كانت لديه نماذج عديدة لنجوم نيوترونية كتلتها 0.3، و0.6، و0.7 كتلة شمسية؛ وقد وجد أنه: إذا لم تكن هناك قوة نووية في كوننا، فإن النجوم النيوترونية ستكون دائماً أقل كتلة من 0.7 كتلة شمسية.

يا لها من مفاجأة! كان التقدير الأولي لأوبنهايمر، قبل أن يبدأ فولكوف في الحوسبة، هو أن الكتلة القصوى تبلغ 6 أضعاف كتلة الشمس. ولحماية النجوم الضخمة من تشكل الثقوب السوداء، كان من الضروري أن تدفع تلك الحسابات الدقيقة الكتلة القصوى إلى مائة شمس أو أكثر. وبدلاً من ذلك، دفع الكتلة إلى الأسفل، إلى 0.7 كتلة شمسية.

جاء تولمان إلى بيركلي لمعرفة المزيد من التفاصيل. وبعد مرور خمسين عامًا، يتذكر فولكوف المشهد بسرور: «أتذكر أنني شعرت بالرهبة الشديدة عندما اضطرتت إلى أن أشرح لأوبنهايمر وتولمان ما فعلته. كنا نجلس في حديقة نادي أعضاء هيئة التدريس القديم في بيركلي. وسط العشب الأخضر الجميل والأشجار العالية، كان هناك هذان السيدان المبدعان، وأنا، طالب دراسات عليا أكمل للتو درجة الدكتوراه، أشرح حساباتي».

والآن بعد أن عرفوا كتل النجوم النيوترونية في عالم مثالي لا توجد فيه قوة نووية، أصبح أوبنهايمر وفولكوف جاهزين لتقدير تأثير القوة النووية. هنا كانت الصيغ التي وضعها تولمان بعناية شديدة لمختلف المعادلات الافتراضية للحالة مفيدة. من خلال صيغ تولمان يمكن للمرء أن يرى تقريبًا كيف سيتغير هيكل النجم إذا كانت القوة النووية تنافرية، وبالتالي جعل معادلة الحالة أكثر «خشونة» من تلك التي استخدمها فولكوف، والتغيير إذا كانت القوة النووية تجاذبية وبالتالي تصبح معادلة الحالة أكثر «نعومة». وفي نطاق القوى النووية المعقولة، لم تكن تلك التغييرات كبيرة. وخلص تولمان وأوبنهايمر وفولكوف إلى أنه لا يزال هناك حد أقصى لكتلة النجوم النيوترونية، ويجب أن يقع في مكان ما بين نحو نصف كتلة شمسية وعدة كتل شمسية.

لا يمكن أن يكون استنتاج أوبنهايمر وفولكوف مُرضيًا لأشخاص مثل إدينجتون وأينشتاين، اللذين اعتبروا الثقوب السوداء لعنة. إذا كان ينبغي تصديق تشاندراسخار (كما حدث في عام 1938، فإن معظم علماء الفلك فهموا لماذا يتوجب عليهم ذلك)، وإذا كان ينبغي تصديق أوبنهايمر وفولكوف (إذ أصبح من الصعب دحضهما)، فلن تكون هناك مقبرة للقمز الأبيض ولا مقبرة النجوم النيوترونية والتي يمكنها أن تضم نجومًا ضخمة. فهل كانت هناك أي طريقة يمكن تصورها على الإطلاق لتجنب النجوم الضخمة موتة الثقب الأسود؟ الإجابة هي نعم؛ وبطريقتين.

أولاً، قد تقذف جميع النجوم الضخمة قدرًا كبيرًا من المادة مع تقدمها في العمر (على سبيل المثال، عن طريق هبوب رياح قوية بعيدًا عن أسطحها أو عن طريق الانفجارات النووية (إلى الخارج))، مما يؤدي إلى تقليص حجمها إلى أقل من 1.4 كتلة شمسية ودخول مقبرة الأقزام البيضاء، أو إذا تبنت آلية زفيكي للمستعرات العظمى - والتي لم يقدم عليها سوى عدد قليل من الناس - فقد يقذف النجم الكثير من المادة في انفجارات المستعرات العظمى بحيث تنخفض إلى أقل من كتلة شمسية واحدة تقريبًا في أثناء الانفجار وينتهي بها الأمر في مقبرة النجوم النيوترونية. وقد تبنت معظم علماء الفلك، خلال الأربعينيات والخمسينيات، وحتى أوائل الستينيات من القرن العشرين - إذا فكروا في هذه القضية بأي شكل - هذا الرأي.

ثانيًا، إلى جانب مقبرة الأقزام البيضاء والنجوم النيوترونية والثقوب السوداء، قد تكون

هناك مقبرة رابعة للنجوم الضخمة، وهي مقبرة لم تكن معروفة في الثلاثينيات. على سبيل المثال، يمكن للمرء أن يتخيل مقبرة في الشكل 5.3 ذات أطوال محيطات تتوسط النجوم النيوترونية والأقزام البيضاء؛ أي بضع مئات أو آلاف الكيلومترات. قد يتوقف انكماش نجم ضخم في مثل هذه المقبرة قبل أن يصبح النجم صغيراً بما يكفي ليشكل إما نجماً نيوترونياً أو ثقباً أسود.

لو لم تتدخل الحرب العالمية الثانية ثم الحرب الباردة، لكان من المحتمل أن يستكشف أوبنهايمر وطلابه أو غيرهم مثل هذا الاحتمال في الأربعينيات، وكانوا سيثبتون بشكل قاطع أنه لا توجد مثل هذه المقبرة الرابعة.

ومع ذلك، فقد اندلعت الحرب العالمية الثانية، واستوعبت طاقات جميع علماء الفيزياء النظرية في العالم تقريباً؛ ثم بعد الحرب، أدت البرامج المكثفة لتطوير القنابل الهيدروجينية إلى تأخير عودة الفيزيائيين إلى حياتهم الطبيعية (انظر الفصل التالي).

أخيراً، في منتصف الخمسينيات من القرن الماضي، خرج عالماً فيزياء من جهودهما في صنع قنبلة هيدروجينية، واستمررا من حيث توقف أوبنهايمر وطلابه. كانا جون أرتشبالد ويلر من جامعة برينستون في الولايات المتحدة، وياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيتش من معهد الرياضيات التطبيقية في موسكو، وهما فيزيائيان رائعان، وسيكونان من الشخصيات الرئيسية في بقية هذا الكتاب.

ويلر

في مارس 1956، خصص ويلر عدة أيام لدراسة مقالات تشاندراسخار ولانداو وأوبنهايمر وفولكوف. لقد أدرك أن هناك لغزاً يستحق البحث. هل يمكن أن يكون صحيحاً أن النجوم ذات الكتلة الأكبر من نحو 1.4 شمس ليس أمامها خيار عندما تموت سوى تكوين ثقب سوداء؟ كتب ويلر بعد ذلك بوقت قصير: «من بين جميع آثار النسبية العامة على بنية الكون وتطوره، فإن مسألة مصير الكتل الكبيرة من المادة هي واحدة من أكثر الأسئلة تحدياً». وشرع في استكمال استكشاف المقابر النجمية التي بدأها تشاندراسخار وأوبنهايمر وفولكوف.

ولجعل مهمته دقيقة للغاية، صاغ ويلر توصيفاً دقيقاً لنوع المادة التي يجب أن تتكون منها النجوم الباردة الميتة: أطلق عليها اسم المادة عند نقطة النهاية للتطور النووي الحراري، نظراً

لأن كلمة النوية الحرارية أصبحت شائعة للتفاعلات الاندماجية التي تعمل على حرق الطاقة النووية في النجوم وأيضًا تشغيل القنبلة الهيدروجينية. فمثل هذه المادة ستكون باردة تمامًا، وستكون قد احترق وقودها النووي بالكامل؛ ولن تكون هناك طريقة، بأي نوع من التفاعل النووي، لاستخراج المزيد من الطاقة من أنوية المادة. لهذا السبب، سيُستخدم لقب «المادة الباردة الميتة» في هذا الكتاب بدلًا من «المادة عند نقطة النهاية للتطور النووي الحراري».

وضع ويلر لنفسه هدفًا يتمثل في فهم جميع الأشياء التي يمكن تصنيعها من مادة باردة وميتة. وتشمل هذه الأجسام الصغيرة مثل كرات الحديد، والأجرام السماوية الأثقل مثل الكواكب الباردة الميتة المصنوعة من الحديد، والأجرام السماوية التي لا تزال أثقل: الأقزام البيضاء، والنجوم النيوترونية، وأي أنواع أخرى من الأجسام الباردة الميتة والتي تسمح بها قوانين الفيزياء. أراد ويلر الحصول على كتالوج شامل للأشياء الباردة الميتة.



جون أرتشيبالد ويلر، كاليفورنيا. 1954.

[تصوير بلاكستون-شيلبورن، مدينة نيويورك؛ إهداء من ج. أ. ويلر.]

عمل ويلر بنفس الطريقة تقريباً التي عمل بها أوبنهايمر، مع حاشية من الطلاب وباحثي ما بعد الدكتوراه. ومن بينهم اختار ب. كينت هاريسون، وهو مورموني ذو عقلية جدية من ولاية يوتا، للعمل على تفاصيل معادلة الحالة للمادة الباردة الميتة. تصف معادلة الحالة هذه تفاصيل كيفية ارتفاع ضغط هذه المادة عندما تنضغط تدريجياً إلى كثافة أعلى فأعلى -أو بالمثل، كيف تتغير مقاومتها للضغط مع زيادة كثافتها.

كان ويلر مستعداً بشكل رائع لإعطاء هاريسون التوجيه في حساب معادلة الحالة للمادة الباردة الميتة، حيث كان من بين أعظم خبراء العالم في قوانين الفيزياء التي تحكم بنية المادة: قوانين الميكانيكا الكمومية والفيزياء النووية. خلال العشرين عاماً السابقة، طوّر نماذج رياضية قوية لوصف سلوك الأنوية الذرية؛ طوّر مع نيلز بور قوانين الانشطار النووي (انفصال الأنوية الذرية الثقيلة مثل اليورانيوم والبلوتونيوم، وهو المبدأ الكامن وراء القنبلة الذرية)؛ وكان قائد الفريق الذي صمم القنبلة الهيدروجينية الأمريكية (الفصل السادس). وبالاعتماد على هذه الخبرة، أرشد ويلر هاريسون في أثناء تعقيدات التحليل.

وُضِّحَتْ وَنُوقِشَتْ نتيجة تحليلهما، وهي معادلة حالة للمادة الباردة الميتة، في الإطار 5.5. عند كثافات الأقزام البيضاء، كانت نفس معادلة الحالة التي استخدمها تشاندراسخار في دراساته عن الأقزام البيضاء (الفصل الرابع)؛ وفي كثافات النجوم النيوترونية، كانت نفس الكثافة التي استخدمها أوبنهايمر وفولكوف (الإطار 5.4)؛ عند كثافات أقل من الأقزام البيضاء والتي تقع بين الأقزام البيضاء والنجوم النيوترونية، كانت جديدة تماماً.

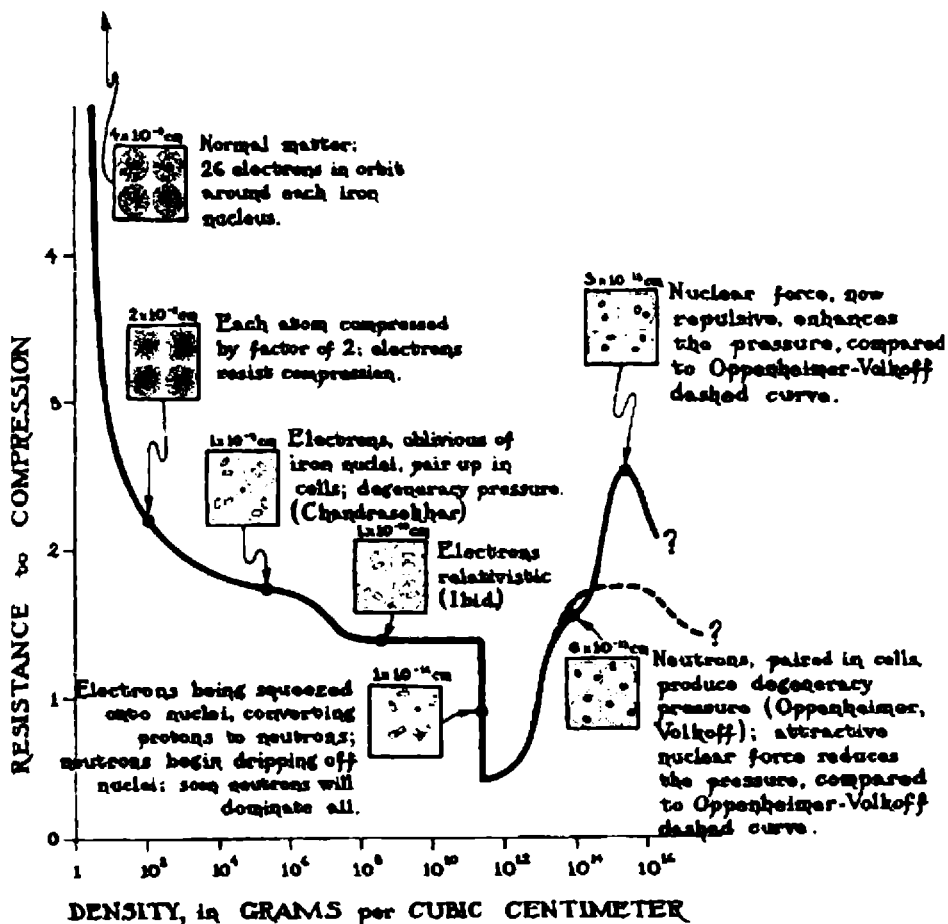
مع معادلة الحالة للمادة الباردة الميتة هذه، طلب جون ويلر من ماسامي واكانو، وهو باحث في مرحلة ما بعد الدكتوراه من اليابان، أن يفعل ما فعله فولكوف بالنسبة إلى النجوم النيوترونية وتشاندراسخار بالنسبة إلى الأقزام البيضاء: اجمع بين معادلة الحالة والنسبية العامة في معادلة تصف توازن الجاذبية والضغط داخل النجم، ومن هذا المزج سنستنتج معادلة تفاضلية تصف بنية النجم؛ ثم حل المعادلة التفاضلية عددياً. سننتج الحسابات الرقمية تفاصيل الهياكل الداخلية لجميع النجوم الباردة والميتة، والأهم من ذلك، كتل النجوم.

تطلبت حسابات بنية نجم واحد (توزيع الكثافة والضغط والجاذبية داخل النجم) من تشاندراسخار وفولكوف عدة أيام من الجهد في أثناء قيامهما بضغط أزرار الآلات الحاسبة الخاصة بهما في كامبريدج وبيركلي في ثلاثينيات القرن العشرين. على النقيض من ذلك، كان واكانو في برينستون في الخمسينيات من القرن العشرين يمتلك واحداً من

أول أجهزة الحاسوب الرقمية في العالم، وهو MANIAC، وهي غرفة مليئة بالأنابيب المفرغة والأسلاك التي تم بناؤها في معهد برينستون للدراسات المتقدمة لاستخدامها في تصميم الحاسوب. القنبلة الهيدروجينية. باستخدام جهاز حاسوب من نوع MANIAC اختصار لجملة المحلل الرياضي المتكامل العددي والحاسوب الآلي النموذجي بالإنجليزية)، تمكن واكانو من تحليل بنية كل نجم في أقل من ساعة.

5.5 الإطار

معادلة هاريسون-ويلر لحالة المادة الباردة الميتة



يصور الرسم أعلاه معادلة الحالة عند هاريسون-ويلر. المرسومة أفقيًا هي كثافة المادة. ترسم مقاومتها للضغط بشكل عمودي (أو مؤشر اللاتبادلية الحرارية، كما يحلو

للفيزيائيين تسميته) - النسبة المئوية للزيادة في الضغط التي تصاحب زيادة في الكثافة بنسبة 1 بالمائة. وتظهر المربعات الملحقة بالمنحنى ما يحدث للمادة، ميكروسكوبياً، حيث تنضغط من كثافات منخفضة إلى كثافات عالية. حجم كل إطار بالسنتيمتر، مكتوب على طول الجزء العلوي من الإطار.

في الكثافات الطبيعية (الحافة اليسرى من الشكل)، تتكون المادة الباردة الميتة من الحديد. إذا كانت الأنوية الذرية للمادة أثقل من الحديد، يمكن إطلاق الطاقة عن طريق تقسيمها لتكوين الحديد (لتصل إلى ثقل الحديد) (الانشطار النووي، كما هي الحال في القنبلة الذرية). إذا كانت نواتها أخف من الحديد، يمكن إطلاق الطاقة عن طريق جمعها معاً لتكوين الحديد (الاندماج النووي، كما هي الحال في القنبلة الهيدروجينية). وبمجرد أن تكون المادة على شكل حديد، فإنها لا تستطيع إطلاق المزيد من الطاقة النووية بأي وسيلة كانت. تعمل القوة النووية على ربط النيوترونات والبروتونات معاً بشكل أكثر إحكاماً عندما تشكل نواة الحديد مقارنة بتشكيلها أي نوع آخر من أنوية الذرات.

عندما ينضغط الحديد من كثافته الطبيعية البالغة 7.6 جرام لكل سنتيمتر مكعب إلى 100، ثم 1000 جرام لكل سنتيمتر مكعب، فإن الحديد يقاوم بنفس الطريقة التي تقاوم بها الصخور الضغط: تحتج إلكترونات كل ذرة بـ «رهاب الأماكن المغلقة» (ما يشبه الانتكاس)؛ حركات ضد الضغط بواسطة إلكترونات الذرات المجاورة. تكون المقاومة في البداية ضخمة ليس لأن قوى التنافر قوية بشكل خاص، بل لأن ضغط البداية - عند الكثافة المنخفضة - منخفض جداً. (تذكر أن المقاومة هي النسبة المئوية للزيادة في الضغط المصاحبة لزيادة الكثافة بنسبة 1 بالمائة. عندما يكون الضغط منخفضاً، تمثل الزيادة القوية في الضغط زيادة كبيرة في النسبة المئوية وبالتالي «مقاومة» ضخمة. لاحقاً، عند الكثافات الأعلى حيث يصبح الضغط كبيراً، وتمثل الزيادة القوية في الضغط نسبة مئوية ذات قيمة أقل وبالتالي مقاومة أضعف).

في البداية، في أثناء انضغاط المادة الباردة، تتجمع الإلكترونات بإحكام حول نواة الحديد، لتشكل سحابةً إلكترونية مكونة من مدارات إلكترونية. (يوجد في الواقع إلكترونان، وليس إلكترونًا واحدًا، في كل مدار - وهي دقة تغاضينا عنها في الفصل الرابع ولكنها نوقشت بإيجاز في الإطار 5.1). ومع استمرار الضغط، ينحصر كل مدار والإلكترونان الموجودان فيه تدريجيًا في خلية أصغر فأصغر من الفراغ؛ تحتج الإلكترونات المختنقة

على هذا الحبس من خلال أن تكون أكثر شبهًا بالموجة وتطور حركات عالية السرعة وغير منتظمة ومختنفة («حركات الانتكاس»؛ انظر الفصل 4).

وعندما تصل الكثافة إلى 10^5 (100.000) جرام لكل سنتيمتر مكعب، تصبح حركات انتكاس الإلكترونات وضغط الانتكاس اللذان تنتجهما كبيرين جدًا لدرجة أنهما يتفوقان تمامًا على القوى الكهربائية التي تسحب بها الأنوية الإلكترونات. لم تعد الإلكترونات تتجمع حول أنوية الحديد؛ لقد أصبحت تتجاهل الأنوية تمامًا. المادة الباردة الميتة التي بدأت ككتلة من الحديد، أصبحت الآن من النوع الذي تتكون منه الأقزام البيضاء، وأصبحت معادلة الحالة هي تلك التي حسبها تشاندراسخار وأندرسون وستونر في أوائل ثلاثينيات القرن العشرين (الشكل 4.3): مقاومة قيمتها $5/3$ ، ثم التحول السلس إلى $4/3$ عند كثافة تبلغ نحو 10^7 جرام لكل سنتيمتر مكعب وعندها تصبح سرعات الإلكترونات غير المنتظمة قريبة من سرعة الضوء.

يبدأ الانتقال من مادة القزم الأبيض إلى مادة النجم النيوتروني بكثافة تبلغ 4×10^{11} جرام لكل سنتيمتر مكعب، وفقًا لحسابات هاريسون ويلر. وتُظهر الحسابات عدة مراحل للانتقال:

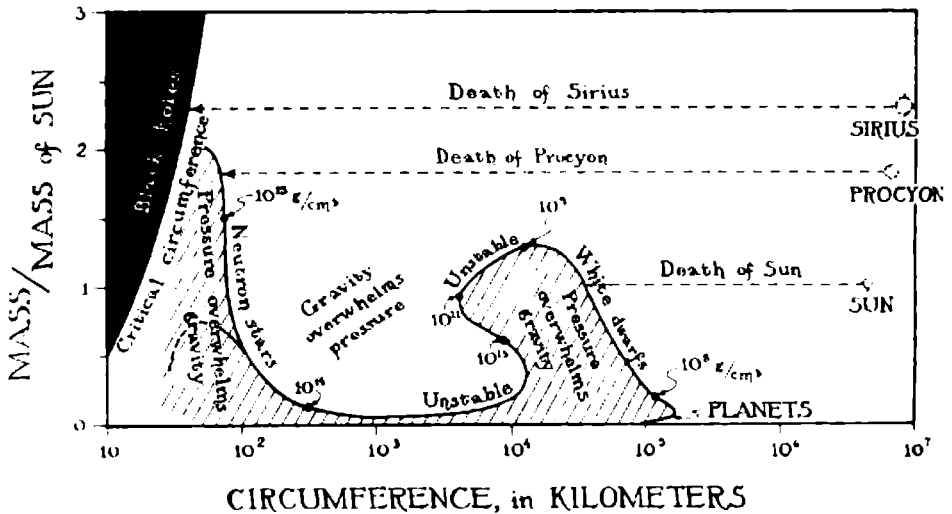
في المرحلة الأولى، تبدأ الإلكترونات في الانضغاط داخل أنوية الذرات، وتبتلعها بروتونات الأنوية لتشكل نيوترونات، بعد أن فقدت بعضًا من إلكتروناتها التي تحافظ على الضغط، تصبح المادة فجأة أقل مقاومة للانضغاط؛ وهذا يسبب الهاوية الحادة في معادلة الحالة (انظر الرسم التوضيحي أعلاه). مع استمرار هذه المرحلة الأولى وانخفاض المقاومة، تصبح الأنوية الذرية متفخخة بالنيوترونات أكثر فأكثر، مما يؤدي إلى إطلاق المرحلة الثانية: تبدأ النيوترونات في التساقط على هيئة نقط من الأنوية (تنضغط إلى خارج) إلى الفراغ بينها، متجاوزة مع عدد قليل من الإلكترونات المتبقية.

هذه النيوترونات المتساقطة، مثل الإلكترونات، تعترض على الضغط المستمر فتنتج ضغط انتكاس خاصًا بها. ينهي ضغط الانتكاس النيوتروني هذا الهبوط الشديد في معادلة الحالة؛ تعافى مقاومة الضغط وتبدأ في الارتفاع. في المرحلة الثالثة، عند كثافات تتراوح بين نحو 4×10^{12} و 10^{12} جرام لكل سنتيمتر مكعب، تنفك كل نواة نيوترونية متفخخة تمامًا؛ أي تنفك إلى نيوترونات فردية، مكونة الغاز النيوتروني الذي درسه أوبنهايمر

وفولكوف، بالإضافة إلى تآثر ضئيل من الإلكترونات والبروتونات. ومن هناك وصعوداً في قيمة الكثافة، تأخذ معادلة الحالة شكل النجم النيوتروني عند أوبنهايمر-فولكوف (المنحنى المتقطع في الرسم التوضيحي عند تجاهل القوى النووية؛ والمنحنى الشخين باستخدام أفضل فهم لتأثير القوى النووية في التسعينيات).

تظهر نتائج حسابات واكانو في الشكل 5.5. هذا الشكل هو الكتالوج الثابت والنهائي للأجسام الباردة والميتة؛ فهو يجيب عن جميع الأسئلة التي طرحناها في وقت مبكر من هذا الفصل في مناقشتنا للشكل 5.3.

في الشكل 5.5، يرسم محيط النجم باتجاه اليمين وكتلته لأعلى. أي نجم يقع محيطه وكتلته في المنطقة البيضاء من الشكل يتمتع بجاذبية داخلية أقوى من ضغطه، لذا فإن جاذبيته تجعل النجم ينكمش باتجاه اليسار في الشكل. أي نجم في المنطقة المظللة لديه ضغط أقوى من الجاذبية، فإن ضغطه يجعل النجم يتوسع باتجاه اليمين في الشكل. فقط على طول الحدود الفاصلة بين المنطقة البيضاء والمظللة، توازن الجاذبية والضغط بعضهما بعضاً بشكل مثالي؛ وبالتالي، فإن منحنى المنطقة الفاصلة هو منحنى النجوم الباردة الميتة التي تكون في حالة توازن الضغط/ الجاذبية.



5.5 أطوال محيطات النجوم الباردة الميتة (مرسومة أفقياً)، والكتل (عمودياً)، والكثافة المركزية (موضحة على المنحنى)، كما حسبها ماسامي واكانو تحت إشراف جون ويلر، باستخدام معادلة

الحالة في الإطار 5.5. عند الكثافات المركزية الأعلى من تلك الخاصة بالنواة الذرية (أعلى من 2×10^{14} جرام لكل سنتيمتر مكعب)، يكون المنحنى بالخط الثخين حديثاً من تسعينيات القرن الماضي، وهو منحنى يأخذ في الاعتبار القوة النووية بشكل صحيح، والمنحنى المتقطع هو منحنى أوبنهايمر وفولكوف من دون القوى النووية.

وبالتحرك على طول منحنى التوازن هذا، يمكن تتبع «النجوم» الميتة ذات الكثافات الأعلى فأعلى. عند أدنى الكثافات (على طول الحافة السفلية من الشكل والمخفية إلى حد كبير عن الأنظار)، فإن هذه «النجوم» ليست نجومًا على الإطلاق، بل هي كواكب باردة مصنوعة من الحديد. (عندما يستنفد المشتري في نهاية المطاف مخزونه الداخلي من الحرارة المشعة فيبرد، على الرغم من أنه يتكون في معظمه من الهيدروجين بدلاً من الحديد، فإنه سيقع بالقرب من أقصى نقطة على منحنى التوازن) وعند كثافة أعلى من الكواكب توجد أقزام تشاندراسخار البيضاء.

عند الوصول إلى أعلى نقطة في جزء القزم الأبيض من المنحنى (القزم الأبيض الذي تبلغ كتلته القصوى 1.4 شمس⁷) ثم الانتقال إلى كثافات أعلى، ستوجد نجوم باردة ميتة لا يمكن أن توجد في الطبيعة لأنها غير مستقرة ضد الانفجار الداخلي أو الانفجار الخارجي (الإطار 5.6). ومع الانتقال من كثافات القزم الأبيض إلى كثافات النجوم النيوترونية، تنخفض كتل هذه النجوم غير المستقرة المتوازنة حتى تصل إلى حد أدنى يبلغ نحو 0.1 كتلة شمسية عند محيط 1000 كيلومتر وكثافة مركزية تبلغ 3×10^{13} جرام لكل سنتيمتر مكعب. هذا هو أول النجوم النيوترونية؛ إنه «القلب النيوتروني» الذي درسه أوبنهايمر وسيربر وأظهرا أنه لا يمكن أن يكون خفيفًا بقيمة 0.001 من كتلة الشمس، والتي أرادها لاندאו للقلب النيوتروني داخل الشمس.

5.6 الإطّار

سكنى غير مستقرة في الفجوة بين الأقزام البيضاء والنجوم النيوترونية

على طول منحنى التوازن في الشكل 5.5، تكون جميع النجوم الواقعة بين الأقزام البيضاء والنجوم النيوترونية غير مستقرة. ومن الأمثلة على ذلك النجم الذي تبلغ كثافته المركزية 10^{13} جرام لكل سنتيمتر مكعب، والذي تبلغ كتلته وطول محيطه عند تلك النقطة في الشكل 5.5 التي تحمل علامة 10^{13} . عند النقطة 10^{13} ، يكون هذا النجم في حالة توازن؛ الجاذبية والضغط يوازن بعضهما بعضًا بشكل مثالي. ومع ذلك، فإن النجم يكون غير مستقر مثل قلم رصاص يقف على سته.

إذا كانت بعض القوى العشوائية ضعيفة (على سبيل المثال، سقوط الغاز بين-النجمي على النجم) فستضغط النجم قليلاً جداً؛ أي تقلل من محيطه بحيث يتحرك نحو اليسار قليلاً في الشكل 5.5 إلى المنطقة البيضاء، وسوف تتغلب جاذبية النجم على ضغطه وسيسحب النجم إلى الانفجار الداخلي؛ عندما ينفجر النجم، فإنه سيتحرك بقوة نحو اليسار خلال الشكل 5.5 حتى يعبر منحنى النجم النيوتروني إلى المنطقة المظللة؛ هناك سيرتفع ضغط النيوترون بشكل كبير، ويوقف الانفجار الداخلي، ويدفع سطح النجم إلى الخارج حتى يستقر النجم في قبر النجم النيوتروني، على منحنى النجم النيوتروني.

على النقيض من ذلك، عندما يكون النجم عند النقطة 10^{13} ، بدلاً من الانضغاط الداخلي عن طريق قوة عشوائية صغيرة، تدفع سطحه إلى الخارج قليلاً (على سبيل المثال، من خلال زيادة عشوائية في الحركات غير المنتظمة لبعض نيوتروناته). ثم سيدخل المنطقة المظللة حيث يتغلب الضغط على الجاذبية؛ سيؤدي ضغط النجم بعد ذلك إلى انفجار سطحه إلى الخارج عبر منحنى القزم الأبيض وإلى المنطقة البيضاء من الشكل؛ وهناك ستتحكم جاذبيته في الوضع وتسحبه إلى الداخل نحو منحنى القزم الأبيض وقبر القزم الأبيض.

عدم الاستقرار هذا (إذا انضغط النجم 10^{13} قليلاً فسوف ينفجر ليصبح نجماً نيوترونياً، أو يتوسع قليلاً وسينفجر ليصبح قزماً أبيض) يعني أنه لا يمكن لأي نجم حقيقي أن يعيش لفترة طويلة عند النقطة 10^{13} ، أو عند أي نقطة أخرى على طول الجزء من منحنى التوازن الذي يحمل علامة «غير مستقر».

وبالمضي قدماً على طول منحني التوازن، نلتقي بعائلة النجوم النيوترونية بأكملها، والتي تتراوح كتلتها من 0.1 إلى نحو 2 قدر كتلة الشمس. الحد الأقصى لكتلة النجم النيوتروني الذي يبلغ قرابة شمسين غير مؤكد إلى حد ما حتى في التسعينيات، لأن سلوك القوة النووية عند الكثافات العالية جداً لا يزال غير مفهوم جيداً. يمكن أن يصل الحد الأقصى إلى 1.5 قدر كتلة الشمس ولكن ليس أقل بكثير، أو يصل إلى 3 قدر كتلة الشمس ولكن ليس أعلى كثيراً.

عند قمة منحني التوازن (تقريباً) 2 قدر الكتلة الشمسية، تنتهي النجوم النيوترونية. وعند التحرك على طول المنحني إلى كثافات أعلى، تصبح النجوم المتوازنة غير مستقرة بنفس الطريقة التي تحدث بها تلك الموجودة بين الأقزام البيضاء، والنجوم النيوترونية (الإطار 5.6)، وبسبب عدم الاستقرار هذا، فإن هذه «النجوم»، مثل تلك الموجودة بين الأقزام البيضاء والنجوم النيوترونية لا يمكن أن توجد في الطبيعة. وإذا تشكلت، فإنها سوف تنفجر (إلى الداخل) على الفور لتصبح ثقباً سوداء أو تنفجر (إلى الخارج) لتصبح نجوماً نيوترونية.

الشكل 5.5 واضح تماماً ولا لبس فيه: لا توجد عائلة ثالثة من الأجسام المستقرة والضحمة والباردة والميتة بين الأقزام البيضاء والنجوم النيوترونية. لذلك، عندما تستنفد نجوم مثل الشعري اليمانية - وهي أضخم من شمسين تقريباً - وقودها النووي، فإما أن تطرد كل كتلتها الزائدة وإما أنها سوف تنفجر إلى الداخل متجاوزة كثافات الأقزام البيضاء، وكثافة النجوم النيوترونية، وإلى المحيط الحرج - حيث - في زمن التسعينيات - كان هناك يقين تام من أنها يجب أن تشكّل ثقباً سوداء. الانفجار الداخلي إجباري. بالنسبة إلى النجوم ذات الكتلة الكبيرة بما فيه الكفاية، لا يمكن لضغط انتكاس الإلكترونات ولا القوة النووية بين النيوترونات أن توقف الانفجار الداخلي. الجاذبية تطفئ حتى على القوة النووية.

ومع ذلك، يبقى هناك مخرج، طريقة لإنقاذ جميع النجوم، حتى الأكثر ضخامة، من مصير الثقب الأسود: ربما تقذف كل النجوم الضخمة كتلة كافية في وقت متأخر من حياتها (في الرياح أو الانفجارات)، أو في أثناء موتها، لتصبح كتلتها أقل من مقدار كتلة شمسين تقريباً حتى ينتهي بها الأمر في مقبرة النجم النيوتروني أو القزم الأبيض. خلال الأربعينيات والخمسينيات وأوائل الستينيات من القرن الماضي، مال علماء الفلك إلى تبني هذا الرأي، عندما كانوا يفكرون - أحياناً - في مسألة المصير النهائي للنجوم. (على

العموم، لم يفكروا في هذه القضية. لم تكن هناك بيانات رصد تدفعهم إلى التفكير في الأمر؛ وكانت بيانات الرصد التي جمعوها عن أنواع أخرى من الأجرام السماوية -النجوم العادية والسدم والمجرات- غنية جدًا ومليئة بالتحديات ومجزية بحيث تستحوذ على كامل اهتمام علماء الفلك).

في التسعينيات، نعلم أن النجوم الثقيلة تقذف كميات هائلة من الكتلة مع تقدمها في السن ثم موتها؛ في الحقيقة إنها تقذف الكثير لدرجة أن معظم النجوم المولودة بكتل كبيرة تصل إلى 8 شمس تفقد ما يكفي لينتهي بها الأمر في مقبرة الأقزام البيضاء، ومعظم النجوم المولودة بين نحو 8 إلى 20 شمسًا تفقد ما يكفي لينتهي بها الأمر في مقبرة النجم النيوتروني. وهكذا، تبدو الطبيعة كأنها تحمي نفسها من الثقوب السوداء. لكن ليس تمامًا: ترجح بيانات الرصد (وإن لم تثبت بشكل قاطع بعد) أن معظم النجوم التي تولد أثقل من نحو 20 شمسًا تظل ثقيلة جدًا عندما تموت، بحيث لا يوفر ضغطها أي حماية ضد الجاذبية. عندما تستنفد وقودها النووي وتبدأ في البرودة، تتفوق الجاذبية على ضغطها وتنفجر لتشكل الثقوب السوداء. وسنلتقي ببعض البيانات الرصدية التي تشير إلى ذلك في الفصل الثامن.

هناك الكثير مما يمكن تعلمه عن طبيعة العلم والعلماء من دراسات النجوم النيوترونية والقلب النيوتروني في ثلاثينيات القرن العشرين.

كانت الأجرام السماوية التي درسها أوبنهايمر وفولكوف هي نجوم زفيكي النيوترونية وليست أنوية لاندau النيوترونية، نظرًا لعدم وجود غلاف محيط بها من المادة النجمية. ومع ذلك، لم يكن أوبنهايمر يحترم زفيكي كثيرًا لدرجة أنه رفض استخدام تسمية زفيكي لها، وأصر على استخدام اسم لاندau بدلًا من ذلك. وهكذا، فإن مقاله مع فولكوف الذي يصف فيه نتائجهما، والذي نُشر في عدد 15 فبراير 1939 من مجلة المراجعات الفيزيائية، يحمل عنوان «حول الأنوية النيوترونية الضخمة». وللتأكد من أن أحدًا لن يخطئ في أصل أفكاره حول هذه النجوم، رُشَّ أوبنهايمر المقال بإشارات إلى لاندau. ولم يستشهد ولو مرة واحدة بعدد كبير من الأبحاث المنشورة السابقة لزفيكي عن النجوم النيوترونية.

من جانبه، شاهد زفيكي بذعر متزايد عام 1938، تولمان، وأوبنهايمر، وفولكوف يتابعون دراساتهم حول بنية النجم النيوتروني.

كيف يمكنهم فعل هذا؟ لقد غضب.

كانت النجوم النيوترونية أطفاله، وليست أطفالهم؛ لم يكن لديهم أي عمل في مجال النجم النيوتروني، بجانب ذلك، على الرغم من أن تولمان كان يتحدث معه من حين لآخر، فإن أوبنهايمر لم يكن يستشير على الإطلاق!

ومع ذلك، في العدد الكبير من الأوراق البحثية التي كتبها زفيكي عن النجوم النيوترونية، لم يكن هناك سوى الحديث والتكهنات، ولم تكن هناك تفاصيل حقيقية. لقد كان مشغولاً للغاية بإجراء بحث رسدي رئيسي (وناجح للغاية) عن المستعرات العظمى، وإلقاء محاضرات وكتابة أوراق بحثية حول فكرة النجم النيوتروني ودوره في المستعرات العظمى، لدرجة أنه لم يحاول مطلقاً ملء التفاصيل. لكن روحه التنافسية تتطلب الآن اتخاذ إجراء.

في أوائل عام 1938، بذل قصارى جهده لتطوير نظرية رياضية مفصلة عن النجوم النيوترونية وربطها ببياناته الرصدية عن المستعرات العظمى. نُشرت أفضل جهوده في عدد 15 أبريل 1939 من مجلة المراجعات الفيزيائية تحت عنوان «حول نظرية وبيانات الرصد للنجوم شديدة الانهيار». ورقته أطول مرتين ونصف من ورقة أوبنهايمر وفولكوف. ولا تحتوي على إشارة واحدة إلى مقال أوبنهايمر-فولكوف الذي صدر قبل شهرين، على الرغم من أنه يشير إلى مقال فرعي وثانوي بقلم فولكوف وحده؛ ولا تحتوي على شيء واحد يمكن تذكره. في الحقيقة كان الكثير منها ببساطة خاطئاً. وعلى النقيض من ذلك، فإن ورقة أوبنهايمر-فولكوف هي دراسة رائعة، وأنيقة، وغنية بالرؤى، وصحيحة في كل التفاصيل.

على الرغم من ذلك، يُبجّل زفيكي اليوم، بعد أكثر من نصف قرن، لاختراعه مفهوم النجم النيوتروني، وإدراكه، بشكل صحيح، أن النجوم النيوترونية تنشأ في انفجارات المستعرات العظمى وتنشطها، ولإثباته بالبيانات الرصدية، مع بادي، أن المستعرات العظمى هي في الواقع فئة فريدة من الأجسام الفلكية، لبدء وتنفيذ دراسة رصدية نهائية استمرت لعقود من الزمن للمستعرات العظمى - ولمجموعة متنوعة من الأفكار الأخرى التي لا علاقة لها بالنجوم النيوترونية أو المستعرات العظمى.

كيف يمكن لرجل لديه هذا الفهم الضئيل لقوانين الفيزياء أن يكون ذا بصيرة إلى هذا الحد؟ رأيي الخاص هو أنه جسد مزيجاً رائعاً من سمات الشخصية: فهم كافٍ للفيزياء

النظرية لوضع الأمور في نصابها الصحيح من الناحية النوعية، إن لم يكن من الناحية الكمومية؛ فضول شديد جدًا لمواكبة كل ما يحدث في الفيزياء وعلم الفلك؛ القدرة على التمييز -بشكل حدسي- بطريقة لا يقدر عليها الكثيرون، التمييز بين الظواهر المتباينة؛ والأهم من ذلك، إيمانه الكبير بمساره الداخلي نحو الحقيقة لدرجة أنه لم يكن لديه أي خوف على الإطلاق من جعل نفسه أضحوكة من خلال تخميناته. كان يعلم أنه على حق (على الرغم من أنه لم يكن كذلك في كثير من الأحيان)، ولم يكن هناك جبل من الأدلة يمكن أن يقنعه بعكس ذلك.

كان لاندau، مثل زفيكي، يتمتع بثقة كبيرة بالنفس وقليل من الخوف من الظهور بمظهر الأحمق. على سبيل المثال، لم يتردد في نشر فكرته التي طرحها عام 1931 والتي تقول إن النجوم تستمد طاقتها من أنوية نجمية فائقة الكثافة تفشل فيها قوانين الميكانيكا الكمومية. في إتقان الفيزياء النظرية، تفوق لاندau تمامًا على زفيكي؛ وكان من بين المنظرين (علماء الفيزياء النظرية) العشرة الأوائل في القرن العشرين. ومع ذلك، كانت تخميناته خاطئة وكانت تخمينات زفيكي على حق. الأنوية النيوترونية لا تنشط الشمس؛ تنشط المستعرات العظمى عن طريق النجوم النيوترونية. هل كان لاندau، على النقيض من زفيكي، سيئ الحظ بكل بساطة؟ ربما جزئيًا. ولكن هناك عاملًا آخر: كان زفيكي منغمسًا في الغلاف الجوي لجبل ويلسون، الذي كان آنذاك أعظم مركز للرصد الفلكي في العالم. وقد تعاون مع أحد أعظم علماء الفلك الرصديين في العالم، وهو والتر باداي، الذي كان أستاذًا في بيانات الرصد. وفي معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، كان بإمكانه التحدث يوميًا تقريبًا مع أعظم مراقبي الأشعة الكونية في العالم. على النقيض من ذلك، لم يكن لاندau تقريبًا على اتصال مباشر بعلم الفلك الرصدي، وتُظهر مقالاته ذلك. ومن دون هذا الاتصال، لم يتمكن من تطوير إحساس حاد بما تبدو عليه الأمور هناك، بعيدًا عن الأرض. كان أعظم انتصارات لاندau هو استخدامه المتقن لقوانين الميكانيكا الكمومية لشرح ظاهرة الميوعة الفائقة، وفي هذا البحث، تفاعل بشكل مكثف مع عالم الفيزياء التجريبية بيوتر كاييتسا، الذي كان يبحث في تفاصيل الميوعة الفائقة.

بالنسبة إلى أينشتاين، على النقيض من زفيكي ولاندau، كان الاتصال الوثيق بين الملاحظة والنظرية ذا أهمية قليلة؛ اكتشف قوانينه النسبية العامة للجاذبية من دون أي مدخلات رصدية تقريبًا. لكن ذلك كان استثناءً نادرًا. يعد التفاعل الغني بين بيانات الرصد

والنظرية أمرًا ضروريًا للتقدم في معظم فروع الفيزياء وعلم الفلك.

وماذا عن أوبنهايمر، الرجل الذي كانت براعته في الفيزياء مماثلة لبراعة لاندائو؟ يعتبر مقاله مع فولكوف حول بنية النجوم النيوترونية واحدًا من أعظم مقالات الفيزياء الفلكية على الإطلاق. ولكن، على الرغم من عظمته وجماله، فإنه «مجرد» حشو بتفاصيل مفهوم النجم النيوتروني. في الحقيقة كان هذا المفهوم ابن زفيكي، كما هي الحال بالنسبة إلى المستعرات العظمى وإمداد المستعرات العظمى بالطاقة عن طريق الانفجار الداخلي لقلب نجمي لتكوين نجم نيوتروني. لماذا كان أوبنهايمر، رغم كل ما حصل عليه، أقل ابتكارًا بكثير من زفيكي؟ في المقام الأول، على ما أعتقد، لأنه رفض -وربما كان يخشى- التخمين. وقد وصف إيزيدور رابي -وهو صديق مقرب ومعجب بأوبنهايمر- ذلك بطريقة أعمق بكثير:

«يبدو لي أن أوبنهايمر -في بعض النواحي- كان متعلمًا بشكل مفرط في تلك المجالات التي تقع خارج التقاليد العلمية، مثل اهتمامه بالدين -الديانة الهندوسية على وجه الخصوص- مما أدى إلى الشعور بسر الكون. الذي أحاط به تقريبًا مثل الضباب. لقد رأى الفيزياء بوضوح، وهو ينظر إلى ما أنجز بالفعل، ولكن عند الحدود كان يميل إلى الشعور بأن هناك الكثير من الغموض والغربة أكثر مما كان عليه في الواقع. لم يكن واثقًا بما فيه الكفاية بقوة الأدوات الفكرية التي امتلكها بالفعل ولم يدفع بفكره إلى النهاية، لأنه شعر بشكل غريزي أن الأفكار الجديدة والأساليب الجديدة ضرورية للذهاب إلى أبعد مما ذهب إليه هو وطلابه بالفعل».

1. تتناسب كمية الضوء المستقبلية على الأرض عكسًا مع مربع المسافة إلى المستعر الأعظم، لذا فإن عامل الخطأ 10 في المسافة يعني عامل خطأ 100 في تقدير بادي لإجمالي ناتج الضوء.
2. حصلت المادة المضادة على اسمها من حقيقة أنه عندما يلتقي جسيم من المادة بجسيم من المادة المضادة، فإن أحدهما يفني الآخر.
3. اتضح أن الأشعة الكونية تنتج بعدة طرق مختلفة. ليس من المعروف حتى الآن الطريقة التي تنتج معظم الأشعة الكونية، ولكن هناك احتمالًا قويًا هو تسارع الجسيمات إلى سرعات عالية عن طريق موجات الصدمة في بقايا سحب الغاز من انفجارات المستعرات العظمى، بعد فترة طويلة من انتهاء الانفجارات. إذا كان الأمر كذلك، فإن زفيكي كان على حق، بشكل غير مباشر
4. قدم شرحًا للسبب في الإطار 4.2.

5. قد يبدو هذا مفاجئًا للأشخاص الذين يعتقدون أن القوة النووية أقوى بكثير من قوة الجاذبية. وفي الواقع، تكون القوة النووية أقوى بكثير عندما لا يكون تحت تصرف المرء سوى عدد قليل من الذرات أو الأنوية الذرية. ومع ذلك، عندما يمتلك شخص ما ذرات تساوي عدة كتل شمسية (1057 ذرة) أو أكثر، فإن قوة الجاذبية لجميع الذرات مجتمعة يمكن أن تصبح أقوى بشكل كبير من قوتها النووية. هذه الحقيقة البسيطة تضمن في النهاية، كما سنرى لاحقًا في هذا الفصل، أنه عندما يموت نجم ضخم، فإن جاذبيته الهائلة ستتفوق على تنافر نواته الذرية وستسحقها لتشكل ثقبًا أسود.
6. الميوعة الفائقة هي الغياب التام للزوجة (الاحتكاك الداخلي) الذي يحدث في بعض السوائل عندما تبرد إلى بضع درجات فوق درجة حرارة الصفر المطلق؛ أي تبريدها إلى نحو 270 درجة مئوية تحت الصفر.
7. في الواقع، الحد الأقصى لكتلة القزم الأبيض في الشكل 5.5 (حساب واکانو) هو 1.2 قدر كتلة الشمس، وهو أقل بقليل من 1.4 قدر كتلة الشمس التي حسبها تشاندراسخار. يرجع الاختلاف إلى تركيبة كيميائية مختلفة: فنجوم واکانو مصنوعة من «مادة باردة وميتة» (معظمها من الحديد)، والتي تحتوي على 46٪ من الإلكترونات مثل النيوكليونات (النيوترونات والبروتونات). تتكون نجوم تشاندراسخار من عناصر مثل الهيليوم، والكربون، والنيتروجين، والأكسجين، والتي تحتوي على 50٪ من الإلكترونات أكثر من النيوكليونات. في الواقع، معظم الأقزام البيضاء في كوننا تشبه أقزام تشاندراسخار أكثر من كونها أقرب إلى واکانو. ولهذا السبب، في هذا الكتاب، أفتبس باستمرار قيمة تشاندراسخار للكتلة القصوى: 1.4 شمس.

الفصل السادس: الانفجار الداخلي، إلى أين؟

وفي هذا الفصل، لا يمكن لكل الحجج في الفيزياء النظرية تجنب استنتاج أن الانفجار الداخلي سيُنتج ثقبًا سوداء

لا مفر من المواجهة.

لدى هذين العملاقين، روبرت أوبنهايمر وجون أرتشيبالد ويلر، وجهات نظر مختلفة حول الكون والحالة الإنسانية لدرجة أنهما أصبحا -مرة تلو الأخرى- على طرفي نقيض من القضايا العميقة: الأمن القومي، وسياسة الأسلحة النووية -والآن الثقوب السوداء.

قاعة المواجهة كانت قاعة محاضرات في جامعة بروكسل في بلجيكا. سافر أوبنهايمر وويلر، الجاران في برينستون بولاية نيوجيرسي، إلى هناك مع واحد وثلاثين من كبار الفيزيائيين وعلماء الفلك من جميع أنحاء العالم لمدة أسبوع كامل من المناقشات حول بنية الكون وتطوره.

كان ذلك يوم الثلاثاء، 10 يونيو 1958. انتهى ويلر لتوّه من تقديم نتائج حساباته الأخيرة للعلماء المجتمعين مع كينت هاريسون وماسامي واكانو -الحسابات التي حددت، بشكل واضح، كتل ومحيطات كل النجوم الباردة والميتة المحتملة. (الفصل الخامس). لقد ملأ الفجوات المفقودة في حسابات تشاندراسخار وأوبنهايمر -فولكوف، وأكد استنتاجاتهم: الانفجار الداخلي إلزامي عندما يموت نجم أكبر من شمسين تقريبًا، ولا يمكن للانفجار الداخلي أن ينتج قرمًا أبيض، أو نجمًا نيوترونيًا، أو أي نوع آخر من النجوم الباردة الميتة، إلا إذا أخرجَ النجم المحتضر كتلة كافية لسحب نفسه إلى ما دون الحد الأقصى للكتلة وهو شمسان تقريبًا.

أكد ويلر: «من بين جميع آثار النسبية العامة على بنية الكون وتطوره، فإن مسألة مصير الكتل الكبيرة من المادة هي واحدة من أكثر الأسئلة تحدّيًا». على هذا يمكن أن

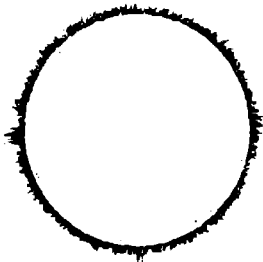
يتفق جمهوره. بعد ذلك، وصف ويلر - فيما يشبه إعادة لهجوم آرثر إدينجتون على تشاندراسخار قبل أربعة وعشرين عامًا (الفصل الرابع) - وجهة نظر أوبنهايمر القائلة بأن النجوم الضخمة يجب أن تموت عن طريق الانفجار الداخلي لتشكل ثقوبًا سوداء، ثم عارضها: مثل هذا الانفجار الداخلي «لا يعطي أي إجابة مقبولة». هكذا أكد ويلر. ولم لا؟ لنفس السبب الذي رفضه إدينجتون؛ وعلى حد تعبير إدينجتون: «يجب أن يكون هناك قانون طبيعي لمنع النجم من التصرف بهذه الطريقة السخيفة. ولكن كان هناك فرق عميق بين إدينجتون وويلر: في حين أن آلية إدينجتون التأملية عام 1935 لإنقاذ الكون من الثقوب السوداء وُصفت على الفور بأنها خاطئة من قبل خبراء مثل نيلز بور، فإن آلية ويلر التأملية عام 1958 لم يكن من الممكن إثباتها أو دحضها في ذلك الوقت - وبعد خمسة عشر عامًا سيتبين أن هذا صحيح جزئيًا (الفصل الثاني عشر).

كانت تكهنات ويلر هي كالتالي. بما أنه (من وجهة نظره) يجب رفض تحول الانفجار الداخلي إلى ثقب أسود باعتباره غير قابل للتصديق من الناحية الفيزيائية، «يبدو أنه لا يوجد مفر من الاستنتاج القائل بأن النيوكليونات [النوترونات والبروتونات] الموجودة في مركز النجم المتفجر يجب بالضرورة أن تتحلل وتحول إلى إشعاع، ويجب أن يهرب هذا الإشعاع من النجم بسرعة كافية لتقليل كتلته [أقل من شمسين تقريبًا]»، لينتهي به الأمر في مقبرة النجوم النيوترونية. اعترف ويلر بسهولة أن مثل هذا التحويل للنيوكليونات إلى إشعاع هارب كان خارج حدود قوانين الفيزياء المعروفة. ومع ذلك، فإن مثل هذا التحويل قد ينبجم عن «التزاوج» غير المفهوم حتى الآن بين قوانين النسبية العامة وقوانين الميكانيكا الكمومية (الفصول من الثاني عشر إلى الرابع عشر). كان هذا بالنسبة إلى ويلر هو الجانب الأكثر إغراءً في «مشكلة الكتلة الكبيرة»: فقد أجبرته عبثية الانفجار الداخلي لتكوين ثقب أسود على التفكير في عملية فيزيائية جديدة تمامًا. (انظر الشكل 6.1).

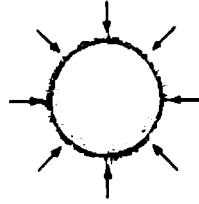
لم يكن أوبنهايمر معجبًا. عندما أنهى ويلر حديثه، كان أول من أخذ الكلمة. وحافظ على أدب لم يُظهره عندما كان شابًا، وأكد وجهة نظره الخاصة: «لا أعرف ما إذا كانت الكتلة غير الدوارة الأثقل كثيرًا من الشمس تحدث بالفعل في أثناء تطور النجوم، ولكن إذا حدث ذلك، أعتقد أنه يمكن وصف انهيارها الداخلي في إطار النسبية العامة [من دون تأكيد قوانين جديدة في الفيزياء]. أَلن يكون أبسط الافتراض هو أن مثل هذه الكتلة تخضع للانكماش تحت تأثير الجاذبية المستمر، وفي النهاية تنعزل أكثر فأكثر عن بقية الكون [أي

تشكّل الثقوب السوداء؟ (انظر الشكل 6.1).

OPPENHEIMER - SNYDER VIEW:



Massive star
exhausts nuclear fuel

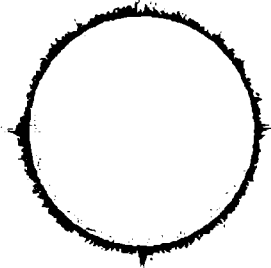


Star implodes

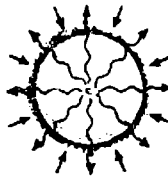


Star cuts itself
off from rest of the
Universe.

WHEELER'S 1958 VIEW:



Massive star
exhausts nuclear fuel



Star's implosion squeezes its
center to extreme density. Quantum
laws plus spacetime curvature convert
nucleons at center into radiation. Radiation
flies away, reducing star's mass and carrying off
information about marriage of quantum physics with
general relativity.



Star, with reduced
mass, settles down
into a pressure/
gravity equi-
librium (neutron
star).

6.1 تبين وجهة نظر أوبنهايمر لمصائر الكتل الكبيرة (التسلسل العلوي) مع وجهة نظر ويلر عام 1958 (التسلسل السفلي).

كان ويلر مهذبًا بنفس القدر، لكنه ظل متمسكًا بموقفه. وأكد: «من الصعب جدًا تصديق أن انقطاع الجاذبية هو إجابة مُرضية».

نشأت ثقة أوبنهايمر بالثقوب السوداء من الحسابات التفصيلية التي أجراها قبل تسعة عشر عامًا:

ولادة الثقب الأسود: لمحة أولى

في شتاء 1938-1939، بعد أن أكمل للتو حساباته مع جورج فولكوف لكتل النجوم النيوترونية ومحيطاتها (الفصل الخامس)، كان أوبنهايمر مقتنعًا تمامًا بأن النجوم الضخمة يجب أن تنفجر من الداخل عند موتها. كان التحدي التالي واضحًا: استخدام قوانين

الفيزياء لحساب تفاصيل الانفجار الداخلي. كيف سيبدو الانفجار الداخلي كما يراه الناس في مدار حول النجم؟ كيف سيبدو كما يراه الأشخاص الذين يركبون على سطح النجم؟ كيف ستكون الحالة النهائية للنجم المتفجر بعد آلاف السنين من الانفجار الداخلي؟

وهذا الحساب لن يكون سهلاً. ستكون مناوراته الرياضية هي التحدي الأكبر الذي واجهه أوبنهايمر وطلابه حتى الآن: فالنجم المتفجر سيغير خصائصه بسرعة مع مرور الوقت، في حين أن نجوم أوبنهايمر-فولكوف النيوترونية ثابتة وغير متغيرة. سيصبح انحناء الزمكان هائلاً داخل النجم المتفجر، في حين أنه كان أقل كثيراً في النجوم النيوترونية. للتعامل مع هذه التعقيدات سيحتاج الأمر إلى طالب مميز جداً. الاختيار أصبح واضحاً: هارتلاند سنايدر.

كان سنايدر مختلفاً عن طلاب أوبنهايمر الآخرين. أما الآخرون فقد جاءوا من عائلات من الطبقة المتوسطة. أعطى سنايدر انطباعاً بالطبقة العاملة، رغم أن والده كان في الواقع مهندساً. ترددت شائعات (بشكل غير صحيح) أنه كان سائق شاحنة في ولاية يوتا قبل أن يصبح فيزيائياً. كما يتذكر روبرت سيربر، «استهزأ هارتلاند بالكثير من الأشياء التي كانت معيارية بالنسبة إلى طلاب أوبي، مثل تقدير باخ وموزارت والذهاب إلى الرباعيات الوترية والإعجاب بالطعام الجيد والسياسة الليبرالية».

كان علماء الفيزياء النووية في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا أكثر صخباً من حاشية أوبنهايمر. في رحلة الربيع السنوية التي قام بها أوبنهايمر إلى باسادينا، رأى أن هارتلاند مناسباً تماماً. يقول ويليام فاوهر من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا: «كان أوبي مثقفاً للغاية؛ عرف الأدب والفن والموسيقى واللغة السنسكريتية. لكن هارتلاند، كان مثلنا، نحن المتشردين. لقد أحب حفلات مختبر كلوق Kellogg Lab، حيث عزف تومي لوريتسن على البيانو وعزف تشارلي لوريتسن [قائد المختبر] على الكمان وغنينا أغاني الكلية وأغاني الشرب. ومن بين جميع طلاب أوبي، كان هارتلاند هو الأكثر استقلالية».

كان هارتلاند مختلفاً أيضاً من الناحية العقلية. يتذكر سيربر قائلاً: «كانت لدى هارتلاند موهبة أكبر في الرياضيات الصعبة من بقيتنا». «لقد كان جيداً جداً في تحسين الحسابات الأكثر بدائية التي قام بها بقيتنا». كانت هذه الموهبة هي التي جعلته طبيعياً لحساب الانفجار الداخلي.

قبل الشروع في الحساب الكامل والمعقد، أصر أوبنهايمر (كما هي الحال دائماً) على إجراء مسح أولي سريع للمشكلة. ما مقدار ما يمكن تعلمه بجهد قليل؟ كان مفتاح هذا المسح الأول هو هندسة سفارتسشيلد للزمكان المنحني خارج النجم (الفصل الثالث).

اكتشف سفارتسشيلد هندسة الزمكان الخاصة به كحل لمعادلة المجال للنسبية العامة لأينشتاين. كان هذا هو الحل للجزء الخارجي من النجم الساكن، الذي لا ينفجر داخلياً ولا خارجياً ولا ينبض. ومع ذلك، في عام 1923، أثبت جورج بيركوف -عالم الرياضيات في جامعة هارفارد- نظرية رياضية رائعة: تصف هندسة سفارتسشيلد للمظهر الخارجي لأي نجم كروي، بما في ذلك النجوم الساكنة، النجوم المتفجرة والناضبة.

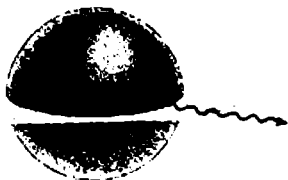
ومن أجل القيام بالحسابات السريعة، افترض أوبنهايمر وسنايدر، ببساطة، أن النجم الكروي عند استنفاد وقوده النووي، سوف ينفجر إلى أجل غير مسمى، ومن دون التحقق مما يحدث داخل النجم، حسبوا الشكل الذي سيبدو عليه النجم المتفجر بالنسبة إلى شخص بعيد. لقد استنتجوا بسهولة؛ بما أن هندسة الزمكان خارج النجم المتفجر هي نفسها خارج أي نجم ساكن، فإن النجم المتفجر سيبدو إلى حد كبير مثل سلسلة من النجوم الساكنة، كل واحد منها منضغط أكثر من سابقه.

في هذا الوقت كان المظهر الخارجي للنجوم الساكنة كهذه قد درس قبل عقدين من الزمن، عام 1920 تقريباً. ويعيد الشكل 6.2 إنتاج مخططات التضمين التي استخدمناها في الفصل الثالث لمناقشة هذا المظهر. تذكر أن كل مخطط تضميني يصوّر انحناء المكان داخل النجم وبالقرب منه. ولجعل التصوير مفهوماً، يعرض الرسم البياني انحناء اثنين فقط من أبعاد المكان الثلاثة: البُعدان على ورقة تقع بالضبط في «مستوى» خط الاستواء للنجم (النصف الأيسر من الشكل). يصوّر انحناء المكان على هذه الصحيفة من خلال تخيل أننا نسحب الصحيفة من النجم ومن المكان المادي الذي نعيش فيه نحن والنجم، وننقلها إلى مكان-فائق وهمي (غير منحني). في المكان-الفائق غير المنحني، يمكن للصحيفة الحفاظ على هندستها المنحنية فقط عن طريق الانحناء للأسفل مثل الوعاء (النصف الأيمن من الشكل).

PHYSICAL SPACE

HYPERSPACE

Circumference =
4x critical



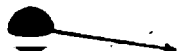
Photon
15% redshifted

Circumference =
2x critical



Photon
41% redshifted

Circumference =
critical



Photon
∞ redshifted

6.2 (مثل الشكل 3.4). تنبؤات النسبية العامة لانحناء المكان والانزياح الأحمر للضوء في سلسلة من ثلاثة نجوم شديدة الانضغاط وثابتة (غير قابلة للانفجار) ولها جميعًا نفس الكتلة ولكن لها أطوال محيطات مختلفة.

يوضح الشكل تسلسلاً لثلاثة نجوم ثابتة تحاكي الانفجار الداخلي الذي كان أوبنهايمر وسنايدر يستعدان لتحليله. كل نجم له نفس الكتلة، لكن محيطه مختلف. الأول أكبر بأربع مرات من المحيط الحرج (أربع مرات أكبر من المحيط الذي تصبح فيه جاذبية النجم قوية جدًا بحيث تشكّل ثقبًا أسود). والثاني هو ضعف المحيط الحرج. والثالث على وجه التحديد عند المحيط الحرج. توضح مخططات التضمين أنه كلما اقترب النجم من محيطه الحرج، كان انحناء المكان حول النجم أكثر تطرفًا. ومع ذلك، فإن الانحناء لا يصبح متطرفًا إلى ما لا نهاية. تكون الهندسة الشبيهة بالوعاء سلسلة في كل مكان من دون وجود أي تنوعات أو نقاط أو تجاعيد حادة، حتى لو أصبح للنجم محيط حرج؛ أي أن انحناء الزمكان ليس لا نهائيًا، وبالمقابل، نظرًا لأن قوى المد والجذر بفعل الجاذبية (أنواع القوى التي تمدد شخصًا ما بين الرأس إلى القدم وتنتج المد والجزر على الأرض)

هي المظهر المادي لانحناء الزمكان، فإن المد والجذر تحت تأثير الجاذبية ليس لا نهائيًا عند المحيط الحرج.

في الفصل الثالث، ناقشنا أيضًا مصير الضوء المنبعث من أسطح النجوم الساكنة. لقد تعلمنا أنه نظرًا لأن الزمن يتدفق بشكل أبداً عند سطح النجم مقارنة بالأمكان البعيدة عن النجم (تمدد الزمن بفعل الجاذبية)، فإن موجات الضوء المنبعثة من سطح النجم والمستقبلية بعيداً عنه ستكون لها فترة تذبذب أطول، وبالتالي طول موجي طويل ولون أكثر احمراراً. ينزاح الطول الموجي للضوء نحو الطرف الأحمر من الطيف حينما يخرج الضوء من المجال الشديد لجاذبية النجم (الانزياح الأحمر بفعل الجاذبية). عندما يكون النجم الساكن أكبر بأربع مرات من محيطه الحرج، فإن الطول الموجي للضوء يزداد بنسبة 15 بالمائة (انظر فوتون الضوء في الجزء العلوي الأيمن من الشكل)؛ عندما يكون النجم 41 بالمائة (وسط اليمين)؛ وعندما يكون النجم بالضبط عند محيطه الحرج، فإن الطول الموجي للضوء ينزاح بشكل لا نهائي نحو الأحمر، مما يعني أن الضوء ليست لديه طاقة على الإطلاق، وبالتالي لم يعد موجوداً.

استنتج أوبنهايمر وسنايدر، في حساباتهما السريعة، شيئين من هذا التسلسل للنجوم الساكنة: أولاً، من المحتمل أن يطور النجم المتفجر - كهذه النجوم الساكنة - انحناءً قوياً في الزمكان عندما يقترب من محيطه الحرج، ولكن ليس انحناءً لا نهائيًا، وبالتالي لن تكون هناك قوى مد وجذب بفعل الجاذبية لا نهائية. ثانياً، عندما ينفجر النجم، يجب أن ينزاح الضوء من سطحه أكثر فأكثر نحو الأحمر، وعندما يصل إلى المحيط الحرج، يجب أن يصبح الانزياح الأحمر لا نهائيًا، مما يجعل النجم غير مرئي تمامًا. وبكلمات أوبنهايمر، يجب على النجم أن «يقطع نفسه» بصرياً عن كوننا الخارجي.

سأل أوبنهايمر وسنايدر نفسيهما: هل هناك أي طريقة يمكن أن تنقذ النجم من مصير القطع هذا باستخدام خصائصه الداخلية - تلك التي أهملت في هذه الحسابات السريعة؟ على سبيل المثال، هل يمكن إجبار الانفجار الداخلي على السير ببطء شديد لدرجة أنه لن يصل فعلياً إلى المحيط الحرج، حتى بعد فترة زمنية لا نهائية؟

رغب أوبنهايمر وسنايدر في الإجابة عن هذه الأسئلة من خلال حساب تفاصيل الانفجار الداخلي الواقعي للنجوم، كما هو موضح في النصف الأيسر من الشكل 6.3.

أي نجم حقيقي سوف يدور حول نفسه، كما تفعل الأرض، على الأقل قليلاً. ستجبر قوى الطرد المركزي الناتجة عن هذا الدوران خط استواء النجم على الانتفاخ (البروز) قليلاً على الأقل، كما يحدث لخط استواء الأرض. وبالتالي، لا يمكن للنجم أن يكون كروياً بدقة.

عندما يتفجر داخلياً، يجب أن يدور النجم بشكل أسرع فأسرع مثل المتزلج الذي يسحب ذراعيه؛ وسيؤدي دورانه الأسرع إلى نمو قوى الطرد المركزي داخل النجم، مما يجعل الانتفاخ الاستوائي أكثر وضوحاً -ربما يكون واضحاً بدرجة كافية حتى إنه يوقف الانفجار الداخلي، حيث تعمل قوى الطرد المركزي الخارجية على موازنة سحب الجاذبية بشكل كامل. يتمتع أي نجم حقيقي بكثافة وضغط عاليين في مركزه، وكثافة وضغط أقل في طبقاته الخارجية؛ في أثناء انفجاره، ستتطور كتل عالية الكثافة هنا وهناك مثل التوت الأزرق في كعكة التوت الأزرق. بالإضافة إلى ذلك، عندما تنفجر المادة الغازية للنجم فإنها ستشكّل موجات صدمية -تشبه أمواج المحيط المتكسرة- وقد تؤدي هذه الصدمات إلى قذف المادة والكتلة من بعض أجزاء سطح النجم تمامًا كما يمكن لموجة المحيط أن تقذف قطرات من الماء إلى الهواء. أخيراً، سوف يتدفق الإشعاع (الموجات الكهرومغناطيسية، وموجات الجاذبية، والنيوترينوات (جمع نيوترينو)) من النجم، وتنقل الكتلة بعيداً.

لقد رغبا -أوبنهايمر وسنايدر- في إدراج كل هذه التأثيرات في حساباتهما، لكن القيام بذلك كان مهمة شاقة، تتجاوز بكثير قدرات أي فيزيائي أو آلة حاسوبية في عام 1939. ولم يصبح الأمر ممكناً حتى ظهور أجهزة الحاسوب الفائقة في الثمانينيات. وبالتالي، لإمكانية إحراز أي تقدم ممكن، كان من الضروري بناء نموذج مثالي للنجم المتفجر ومن ثم حساب تنبؤات قوانين الفيزياء لهذا النموذج.

كانت مثل هذه المثالية هي موطن قوة أوبنهايمر: فعندما واجه موقفاً معقداً بشكل رهيب كهذا الموقف، أمكنه أن يميز بلا خطأ تقريباً أي الظواهر ذات أهمية حاسمة وأيهما الهامشي.

بالنسبة إلى النجم المتفجر (داخلياً)، كانت إحدى السمات هي الحاسمة فوق كل السمات الأخرى، كما اعتقد أوبنهايمر: الجاذبية كما وصفها قوانين النسبية العامة

لأينشتاين. لا ينبغي المساس بها، لأنها، هي وحدها التي يمكن إجراؤها عند صياغة عملية حسابية. على النقيض من ذلك، يمكن تجاهل دوران النجم وشكله غير الكروي؛ قد يكونان ذات أهمية حاسمة بالنسبة إلى بعض النجوم المتفجرة، ولكن بالنسبة إلى النجوم التي تدور ببطء، فمن المحتمل ألا يكون لهما تأثير قوي.

لم يتمكن أوبنهايمر من إثبات ذلك رياضياً - لكنه بدا واضحاً حدسيّاً - وبالفعل تبين أنه صحيح. وبالمثل، قال حدسه إن تدفق الإشعاع كان تفصيلاً غير مهم، وكذلك الموجات الصدمية وكتل الكثافة. بالإضافة إلى ما سبق، بما أن الجاذبية (كما أظهر أوبنهايمر وفولكوف) يمكن أن تتفوق على كل الضغط في النجوم الضخمة الميتة، فقد بدا من الآمن التظاهر (بشكل غير صحيح بالطبع) بأن النجم المتفجر داخلياً ليس لديه ضغط داخلي على الإطلاق - لا الضغط الحراري ولا الضغط الناتج من حركات انتكاس الإلكترونات أو النيوترونات الخائفة، ولا الضغط الناتج عن القوة النووية. قد ينفجر النجم الحقيقي - بضغطه الحقيقي - بطريقة مختلفة عن النجم المثالي عديم الضغط، لكن الاختلافات في الانفجار الداخلي يجب أن تكون متواضعة وليست كبيرة، كما أصر حدس أوبنهايمر.

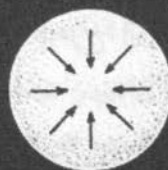
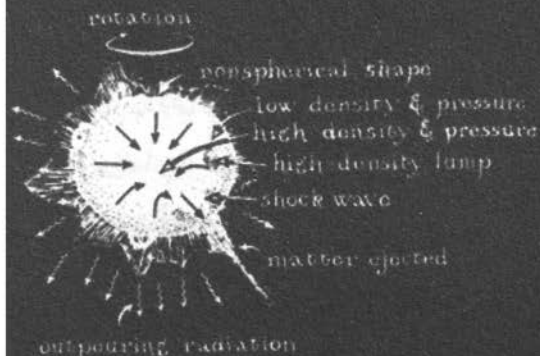
وهكذا اقترح أوبنهايمر على سنايدر مشكلة حسابية مثالية: دراسة - باستخدام القوانين الدقيقة للنسبية العامة - الانفجار الداخلي لنجم مثالي باعتبار أنه نجم كروي بدقة، وغير دوار (حول محوره)، وغير مشع، نجم ذو كثافة متجانسة أو منتظمة (أي له نفس قيمة الكثافة عند السطح كما هي الحال في المركز) ومن دون أي ضغط داخلي على الإطلاق؛ انظر الشكل 6.3.

وحتى مع كل هذه المثاليات - المثاليات التي من شأنها أن تولّد الشكوك لدى الفيزيائيين الآخرين لمدة ثلاثين عاماً قادمة - كانت الحساب صعبة للغاية. لحسن الحظ، أصبح ريتشارد تولمان متاحاً في باسادينا للمساعدة. اعتمد سنايدر بشدة على تولمان وأوبنهايمر للحصول على المشورة، وعمل على حل المعادلات التي تحكم الانفجار الداخلي بأكمله، وبمهارة فائقة تمكن من حلها. أصبحت لديه الآن التفاصيل الكاملة للانفجار الداخلي، معبراً عنها في الصيغ الرياضية! من خلال التدقيق في هذه الصيغ، أوّلاً من اتجاه ثم آخر، يمكن للفيزيائيين قراءة أي جانب من جوانب الانفجار الداخلي الذي يريدونه - كيف يبدو من خارج النجم، وكيف يبدو من الداخل، وكيف يبدو على سطح النجم... إلخ.

IMPLOSION of a REAL STAR

IDEALIZED IMPLODING STAR

studied by
OPPENHEIMER and SNYDER



- precisely spherical
- no rotation
- uniform density
- zero pressure
- no shock waves
- no ejected matter
- no outpouring radiation

6.3 اليسار: الظواهر الفيزيائية في نجم واقعي متفجر. على اليمين: التصورات المثالية التي وضعها أوبنهايمر وسنايدر من أجل حساب الانفجار الداخلي للنجوم.

ومن المثير للاهتمام بشكل خاص ظهور النجم المتفجر كما لوحظ من إطار مرجعي خارجي ثابت؛ أي كما يراه المراقبون خارج النجم الذين يبقون دائماً في نفس المحيط الثابت بدلاً من الاندفاع إلى الداخل مع المادة المتفجرة للنجم. يبدأ النجم، كما يُرى في إطار خارجي ثابت، في الانفجار الداخلي بالطريقة التي يتوقعها المرء. مثل صخرة تسقط من فوق سطح المنزل، يسقط سطح النجم إلى الأسفل (ينكمش إلى الداخل) ببطء في البداية، ثم بسرعة أكبر فأكبر. ولو كانت قوانين نيوتن للجاذبية صحيحة، فإن تسارع الانفجار الداخلي هذا سيستمر بلا هوادة حتى يسحق النجم -الذي يفتقر إلى أي ضغط داخلي- عند نقطة بسرعة عالية. لكن الأمر ليس كذلك وفقاً لصيغ أوبنهايمر وسنايدر النسبية. بدلاً من ذلك، عندما يقترب النجم من محيطه الحرج، يتباطأ انكماشه إلى درجة الحرج. كلما صغر حجم النجم، كان انفجاره أبطأ، حتى يتجمد بالضغط عند المحيط الحرج. بصرف النظر عن المدة التي ينتظرها المرء، إذا كان المرء في حالة سكون خارج النجم (أي، في حالة سكون في الإطار المرجعي الخارجي الثابت)، فلن يتمكن أبداً من

رؤية النجم يتفجر داخلياً عبر المحيط الحرج. هذه هي الرسالة القاطعة لصيغ أوبنهايمر وسنايدر.

هل هذا التجميد للانفجار الداخلي ناجم عن قوة النسبية العامة داخل النجم بشكل غير متوقع؟ لا، على الإطلاق، هكذا أدرك أوبنهايمر وسنايدر. بل هو ناجم عن تمدد الزمن بفعل الجاذبية (تباطؤ تدفق الزمن) بالقرب من المحيط الحرج. الوقت على سطح النجم المتفجر، كما يراه المراقبون الخارجيون الساكنون، يجب أن يتدفق ببطء شديد باستمرار حينما يقترب النجم من المحيط الحرج، وبالتالي فإن كل ما يحدث على النجم أو داخله بما في ذلك انفجاره الداخلي يجب أن يبدو وكأنه يتحرك ببطء ثم تدريجياً يتجمد.

على الرغم من أن هذا قد يبدو غريباً، فإن الأمر الأغرب كان تنبؤاً آخر قدمته صيغ أوبنهايمر وسنايدر: على الرغم من أن الانفجار الداخلي - كما يراه المراقبون الخارجيون الساكنون - يتجمد عند المحيط الحرج، فإنه لا يتجمد على الإطلاق كما يراه المراقبون الذين يتجهون إلى الداخل من سطح النجم. إذا كان النجم يزن بضع كتل شمسية ويبدأ بحجم الشمس تقريباً، وإذا أمكن رصده من سطحه، فإنه يتفجر إلى المحيط الحرج في غضون ساعة تقريباً، ثم يستمر في الانفجار الداخلي إلى ما بعد المحيط الحرج ويصل إلى أطوال محيطات أصغر.

بحلول عام 1939، عندما اكتشف أوبنهايمر وسنايدر هذه الأشياء، أصبح الفيزيائيون معندين على حقيقة أن الزمن نسبي؛ يختلف تدفق الزمن إذا قيس في أطر مرجعية مختلفة تتحرك بطرق مختلفة عبر الكون. ولكن لم يسبق لأي شخص أن واجه مثل هذا الاختلاف الشديد بين الأطر المرجعية. كان من الصعب للغاية فهم حقيقة أن الانفجار الداخلي يتجمد إلى الأبد إذا قيس من الإطار (المرجعي) الخارجى الثابت ولكنه يستمر بسرعة بعد نقطة التجمد إذا قيس من إطار سطح النجم. لم يشعر أحد ممن درسوا رياضيات أوبنهايمر وسنايدر بالارتياح تجاه مثل هذا التغير الشديد في الزمن. ومع ذلك، فقد كان موجوداً في صيغهم. قد يلوح المرء بذراعيه مع تفسيرات إرشادية، ولكن لا يوجد تفسير يبدو مرضياً للغاية. ولن يفهم بالكامل حتى أواخر الخمسينيات (قرب نهاية هذا الفصل). ومن خلال النظر في معادلات أوبنهايمر وسنايدر من وجهة نظر الراصد على سطح النجم، يمكن للمرء استنتاج تفاصيل الانفجار الداخلي حتى بعد أن يفرق النجم داخل

محيطه الحرج؛ أي أنه يمكن للمرء أن يكشف أن النجم ينسحق إلى كثافة لا نهائية وحجم صفر، ويمكن للمرء أن يستنتج تفاصيل انحناء الزمكان عند الانسحاق. ومع ذلك، في مقالهما الذي يصف حساباتهما، تجنب أوبنهايمر وسنايدر أي مناقشة للأزمة على الإطلاق. من المفترض أن أوبنهايمر مُنع من مناقشة الأمر بسبب محافظته العلمية الفطرية، وعدم رغبته في التكهن (انظر الفقرتين الأخيرتين من الفصل الخامس).

إذا كانت قراءة الانهيار الأخير للنجم من صيغهما الرياضية أمرًا صعبًا للغاية لأوبنهايمر وسنايدر، فحتى التفاصيل الخارجية وفي المحيط الحرج كانت غريبة جدًا لمعظم الفيزيائيين في عام 1939. في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، على سبيل المثال، أصبح تولمان مؤمنًا؛ كانت تنبؤات نتائج النسبية العامة واضحة جلية في نهاية المطاف. لكن لم يكن أي شخص آخر في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا مقتنعًا تمامًا.

اختُبرت النسبية العامة تجريبيًا فقط في النظام الشمسي، حيث الجاذبية ضعيفة جدًا لدرجة أن قوانين نيوتن تعطي تقريبًا نفس التنبؤات التي تعطيها النسبية العامة. وعلى النقيض من ذلك، اعتمدت تنبؤات أوبنهايمر وسنايدر الغريبة على الجاذبية فائقة القوة. اعتقد معظم الفيزيائيين أن النسبية العامة قد تفشل قبل أن تصبح الجاذبية قوية جدًا؛ وحتى لو لم تفشل، فربما أساء أوبنهايمر وسنايدر تفسير ما كانت رياضياتهما تحاول قوله؛ وحتى لو لم يسيئا تفسير الرياضيات، فإن حساباتهما كانت مثالية للغاية، وخالية من اللف، والكتل، والصدمات، والإشعاع، بحيث لا ينبغي أن تؤخذ على محمل الجد.

سادت شكوك كهذه في جميع أنحاء الولايات المتحدة وأوروبا الغربية، ولكن ليس في الاتحاد السوفيتي. هناك، احتفظ ليف لاندau، الذي كان لا يزال يتعافى من السنة التي قضاه في السجن، بـ«القائمة الذهبية» لأهم المقالات البحثية الفيزيائية المنشورة في أي مكان في العالم. عند قراءة بحث أوبنهايمر-سنايدر، أدخله لاندau في قائمته، وأعلن لأصدقائه ورفاقه أن اكتشافات أوبنهايمر الأخيرة لا بد أن تكون صحيحة، على الرغم من أنها كانت مستعصية على الفهم للعقل البشري. كان تأثير لاندau عظيمًا جدًا لدرجة أن وجهة نظره سيطرت على كبار علماء الفيزياء النظرية السوفيت منذ ذلك اليوم فصاعدًا.

فاصل نووي

أوبنهايمر وسنايدر، هل كانا على حق أم أنهما مخطئان؟ من المحتمل أن يكون الجواب قد عُرف بشكل نهائي خلال الأربعينيات من القرن الماضي لولا تدخل الحرب العالمية الثانية ثم البرامج المكثفة لتطوير القنبلة الهيدروجينية. لكن الحرب والقنبلة تدخلتا بالفعل، وتجمدت الأبحاث حول القضايا الباطنية غير العملية مثل الثقوب السوداء مع مرور الوقت، حيث وجَّه الفيزيائيون طاقاتهم الكاملة لتصميم الأسلحة.

فقط في أواخر الخمسينيات من القرن الماضي، تضاءلت جهود الأسلحة بشكل كافٍ لإعادة الانفجار النجمي الداخلي إلى وعي الفيزيائيين. عندها فقط شن المتشككون أول هجوم خطير على تنبؤات أوبنهايمر وسنايدر. وكان جون أرثشيلد ويلر هو الذي حمل راية المتشككين في البداية، ولكن ليس لفترة طويلة. منذ البداية، كان زعيم المؤمنين هو نظير ويلر السوفييتي، ياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيش.

تشكلت شخصيتا ويلر وزيلدوفيش في نار مشاريع الأسلحة النووية خلال ما يقرب من عقدين من الزمن، حيث جمدت أبحاث الثقوب السوداء خلال عقدي الأربعينيات والخمسينيات من القرن الماضي. وخلال عملهما في مجال الأسلحة، خرج ويلر وزيلدوفيش بأدوات بالغة الأهمية لتحليل الثقوب السوداء: تقنيات حسابية قوية، وفهم عميق لقوانين الفيزياء، وأساليب بحث تفاعلية يمكن من خلالها تحفيز زملائهم الأصغر سنًا باستمرار. لقد ظهرا أيضًا وهما يحملان أمتعة صعبة -مجموعة من العلاقات المعقدة مع بعض زملائهم الرئيسيين: ويلر مع أوبنهايمر؛ زيلدوفيش مع لاندau ومع أندريه ساخاروف.

كان لجون ويلر، الذي تخرج حديثًا في كلية الدراسات العليا في عام 1933، والفائز بمنحة ما بعد الدكتوراه التي مولها مجلس البحوث القومي التابع لروكفيلر، خيار مكان وجهة دراسته لما بعد الدكتوراه. كان بإمكانه اختيار بيركلي وأوبنهايمر، كما فعل معظم باحثي ما بعد الدكتوراه في الفيزياء النظرية في تلك الأيام؛ بدلًا من ذلك اختار جامعة نيويورك وجريجوري بريت. يقول ويلر: «في الشخصية: كانا (أوبنهايمر وبريت) مختلفين تمامًا» «رأى أوبنهايمر الأمور بالأبيض والأسود وكان سريعًا في اتخاذ القرار. عمل بريت في ظلال من اللون الرمادي، وانجذب إلى القضايا التي تتطلب تفكيرًا طويلًا، فاخترت بريت».

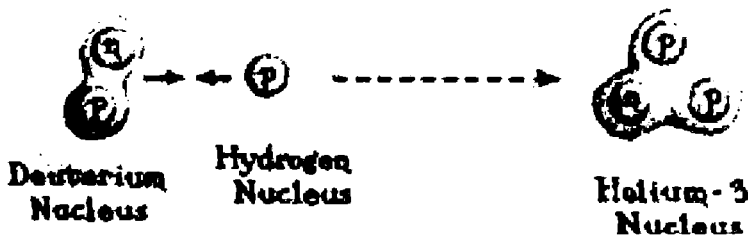
انتقل ويلر من جامعة نيويورك في عام 1933 إلى كوبنهاجن للدراسة مع نيلز بور، ثم إلى منصب أستاذ مساعد في جامعة نورث كارولينا، تلتها جامعة برينستون في نيو جيرسي. في عام 1939، بينما كان أوبنهايمر وطلابه في كاليفورنيا يسبرون أغوار النجوم النيوترونية والثقوب السوداء، كان ويلر وبور في جامعة برينستون (حيث كان بور يزورها) يطوران نظرية الانشطار النووي: تفكك الأنوية الذرية الثقيلة مثل اليورانيوم إلى قطع أصغر، عندما تقصف الأنوية بالنيوترونات (الإطار 6.1). اكتشف الانشطار النووي بشكل غير متوقع على يد أوتو هان وفريتز ستراسمان في ألمانيا، وكانت آثاره مشؤومة: من خلال سلسلة من التفاعلات الانشطارية يمكن صنع سلاح ذي قوة غير مسبوقة. لكن بور وويلر لم يشغلا نفسيهما بالتفاعلات المتسلسلة أو الأسلحة؛ لقد أرادا فقط أن يفهما كيف يحدث الانشطار. ما الآلية الأساسية؟ كيف تنتجها قوانين الفيزياء؟

6.1 الإطار

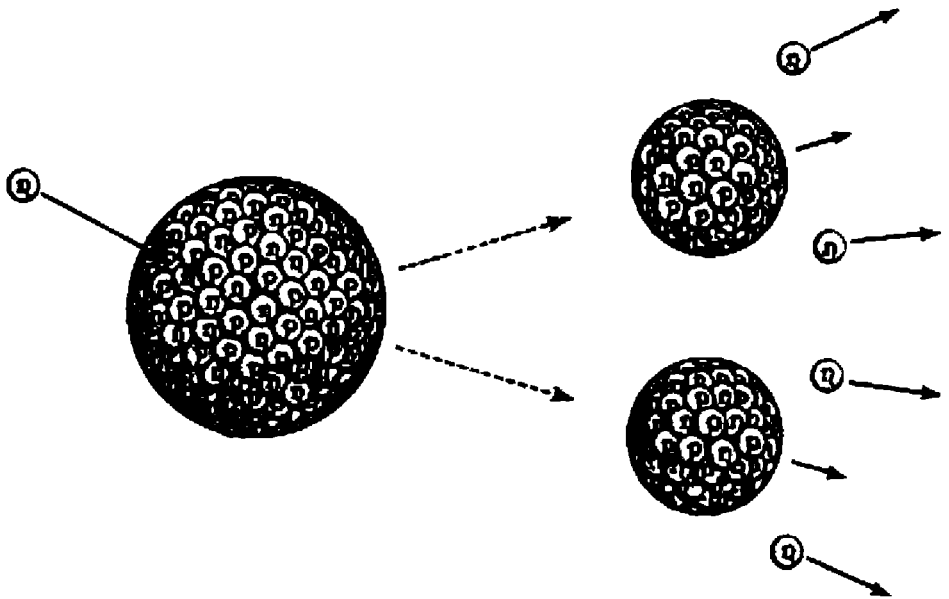
الاندماج والانشطار والتفاعلات المتسلسلة

يؤدي اندماج الأنوية الخفيفة جدًا من أجل تكوين أنوية متوسطة الحجم إلى إطلاق كميات هائلة من الطاقة. مثال بسيط من الإطار 5.3 هو اندماج نواة الديوتيريوم («الهيدروجين الثقيل»، ذو بروتون واحد ونيوترون واحد) ونواة هيدروجين عادية (بروتون واحد) لتشكيل نواة الهيليوم-3 (بروتونان ونيوترون واحد): مثل هذه التفاعلات الاندماجية تُبقي الشمس ساخنة وتمد القنبلة الهيدروجينية بالطاقة («القنبلة الفاتكة» كما كانت تسمى في الأربعينيات والخمسينيات من القرن العشرين).

a few $\times 10^{15}$ centimeter



إن انشطار (انقسام) نواة ثقيلة جدًا لتكوين نواتين متوسطتي الحجم يطلق كمية كبيرة من الطاقة - أكثر بكثير مما تطلقه التفاعلات الكيميائية (نظرًا لأن القوة النووية التي تحكم الأنوية أقوى بكثير من القوة الكهرومغناطيسية التي تحكم الذرات المتفاعلة كيميائيًا)، ولكنها طاقة أقل بكثير من تلك التي تأتي من اندماج الأنوية الخفيفة. تخضع بعض الأنوية الثقيلة جدًا للانشطار بشكل طبيعي، من دون أي مساعدة خارجية. المثير للاهتمام في هذا الفصل هو التفاعلات الانشطارية التي يضرب فيها النيوترون نواة ثقيلة جدًا مثل اليورانيوم 235 (نواة اليورانيوم التي تحتوي على 235 بروتونًا ونيوترونًا) ويقسمها تقريبًا إلى النصف:



هناك نواتان ثقيلتان خاصتان، اليورانيوم 235 والبلوتونيوم 239، مع خاصية أن انشطارهما لا ينتج فقط نواتين متوسطتي الحجم، ولكن أيضًا حفنة من النيوترونات (كما في الرسم أعلاه). تتيح هذه النيوترونات حدوث تفاعل متسلسل: إذا ركز المرء ما يكفي من اليورانيوم 235 أو البلوتونيوم 239 في حزمة صغيرة بما فيه الكفاية، فإن النيوترونات المنطلقة من انشطار واحد سوف تضرب أنوية اليورانيوم أو البلوتونيوم الأخرى وتشطرها، مما ينتج المزيد من النيوترونات التي تشطر المزيد من الأنوية، مما يؤدي إلى إنتاج المزيد من النيوترونات التي تؤدي إلى انشطار المزيد من الأنوية، وهكذا.

نتيجة هذا التفاعل المتسلسل، إذا لم نتحكم فيه، فسيتحول إلى انفجار ضخم (انفجار قنبلة ذرية)؛ وإذا تحكمتنا فيه باستخدام مفاعل، يمكن أن تنتج طاقة كهربائية عالية الكفاءة.

حقق بور وويلر نجاحًا ملحوظًا. اكتشفا كيف تنتج قوانين الفيزياء الانشطار، وتنبأ بالأنوية الفعالة أكثر من غيرها في الحفاظ على التفاعلات المتسلسلة: اليورانيوم 235 (الذي سيصبح الوقود للقنبلة التي ستدمر هيروشيما) والبلوتونيوم 239 (نوع من الأنوية التي لا وجود لها في الطبيعة ولكن الفيزيائيين الأمريكيين سيتعلمون قريبًا كيفية صنعها في المفاعلات النووية وسيستخدمونها لتزويد القنبلة بالوقود لتدمير ناجازاكي). ومع ذلك، لم يكن بور وويلر يفكران في القنابل في عام 1939؛ لقد أرادا فقط أن يفهما.

نُشر مقال بور-ويلر الذي يشرح الانشطار النووي في نفس العدد من مجلة المراجعات الفيزيائية مثل مقال أوبنهايمر-سنايدر الذي يصف الانفجار الداخلي للنجم. كان تاريخ النشر هو 1 سبتمبر 1939، وهو نفس اليوم الذي غزت فيه قوات هتلر بولندا، مما أدى إلى اندلاع الحرب العالمية الثانية.

وُلد ياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيتش لعائلة يهودية في مينسك عام 1914؛ في وقت لاحق من ذلك العام، انتقلت عائلته إلى سان بطرسبرج (أعيد تسميتها لينينجراد في عشرينيات القرن الماضي، ثم أعيدت إلى سانت بطرسبرج في التسعينيات). أنهى زيلدوفيتش دراسته الثانوية في سن الخامسة عشرة، وبعد ذلك، بدلاً من دخول الجامعة، ذهب للعمل كمساعد مختبر في المعهد الفيزيائي التقني في لينينجراد. هناك علّم نفسه الكثير من الفيزياء والكيمياء وقام بأبحاث مثيرة للإعجاب لدرجة أنه -من دون أي تدريب جامعي رسمي- حصل على درجة الدكتوراه في عام 1934 عن عمر ناهز العشرين.

في عام 1939، بينما ويلر وبور يطوران نظرية الانشطار النووي، كان زيلدوفيتش وصديقه المقرب، يولي بوريسوفيتش خاريتون، يطوران نظرية التفاعلات المتسلسلة الناتجة عن الانشطار النووي: كان بحثهما ناتجًا عن اقتراح مثير للاهتمام (غير صحيح) من الفيزيائي الفرنسي فرانسيس بيرين أن الانفجارات البركانية قد تكون مدعومة بالانفجارات النووية الطبيعية تحت الأرض، والتي تنتج عن تفاعل متسلسل لانشطار الأنوية الذرية. ومع ذلك، لم يتمكن أحد، بما في ذلك بيرين، من التوصل إلى تفاصيل

مثل هذا التفاعل المتسلسل. لقد انتقل زيلدوفيش وخاريتون -وهما من أفضل الخبراء في العالم في مجال الانفجارات الكيميائية- إلى هذه المشكلة.

وفي غضون بضعة أشهر أثبتنا (كما فعل آخرون في الغرب بالتوازي) أن مثل هذا الانفجار من غير الممكن أن يحدث في الطبيعة، لأن اليورانيوم الموجود طبيعياً يتكون في أغلبه من اليورانيوم 238 وليس ما يكفي من اليورانيوم 235. ومع ذلك، فقد خلاصا إلى أنه إذا فُصل اليورانيوم 235 بشكل صناعي وأمكن تركيزه، يمكن إجراء انفجار تفاعلي متسلسل. (وسرعان ما سيشرع الأمريكيون في عملية الفصل هذه لإنتاج الوقود اللازم لقنبلة هيروشيما). ولم يكن ستار السرية قد أُسدل بعد حول الأبحاث النووية، لذا نشر زيلدوفيش وخاريتون حساباتهما في أرقى مجلات الفيزياء السوفيتية، وهي دورية الفيزياء التجريبية والنظرية، ليراها العالم أجمع.

خلال السنوات الست من الحرب العالمية الثانية، طور فيزيائيو الدول المتحاربة السونار، وكاسحات الألغام، والصواريخ، والرادار، والأهم من ذلك، القنبلة الذرية. قاد أوبنهايمر «مشروع مانهاتن» في لوس ألamos، نيو مكسيكو، لتصميم وبناء القنابل الأمريكية. كان ويلر العالم الرئيسي في تصميم وبناء أول مفاعلات نووية على مستوى الإنتاج في العالم، في هانفورد بواشنطن، والتي صنعت البلوتونيوم 239 لقنبلة ناجازاكي. بعد تدمير القنبلتين النوويتين في هيروشيما وناجازاكي ومقتل مئات الآلاف من الأشخاص، شعر أوبنهايمر بالألم: «إذا أضيفت القنابل الذرية إلى ترسانات العالم المتحارب، أو إلى ترسانات الدول التي تستعد للحرب، فلا بد وأن يأتي الوقت الذي ستلعب فيه البشرية اسم لوس ألamos وهيروشيما، بنوع من المفاجأة، والتي لا يمكن لأي ابتذال أو فكاكة أو مبالغة أن تغيرها، لقد عرف الفيزيائيون الخطيئة؛ وهذا علم لا يمكنهم أن يضيعوه».

لكن ويلر كان لديه نوع معاكس من الندم: «عندما أنظر إلى الماضي [عام 1939 ونظريتي الانشطارية مع بور]، أشعر بحزن شديد. كيف حدث أنني نظرت إلى الانشطار أولاً كعالم فيزياء [ببساطة فضولي لمعرفة كيفية عمل الانشطار]، وفقط بشكل ثانوي كمواطن [عازم على الدفاع عن بلدي]؟ لماذا لم أنظر إليه أولاً كمواطن وثانياً كفيزيائي؟ يُظهر مسح بسيط للسجلات أن ما بين عشرين وخمسة وعشرين مليون شخص لقوا

حتفهم في الحرب العالمية الثانية، وأكثر منهم في السنوات اللاحقة مقارنة بالسنوات السابقة. كل شهر قُصرت فيه مدة الحرب كان يعني إنقاذ حياة ما يقرب من نصف مليون إلى مليون شخص. ومن بين الذين مُنحوا الحياة أخي جو، الذي قُتل في أكتوبر 1944 في معركة إيطاليا. وكم كان سيحدث لو أن التاريخ الحرج [لأول استخدام للقنبلة الذرية في الحرب] لم يكن 6 أغسطس 1945، بل 6 أغسطس 1943؟».

في الاتحاد السوفيتي، تخطى الفيزيائيون عن جميع الأبحاث النووية في يونيو 1941، عندما هاجمت ألمانيا روسيا، لأن الفيزياء الأخرى من شأنها أن تنتج نتائج أسرع للدفاع الوطني. في أثناء تقدم الجيش الألماني ومحاصرة لينينجراد، أُجلى زيلدوفيش وصديقه خاريتون إلى قازان، حيث عملا بشكل مكثف على نظرية انفجار الأنواع العادية من القنابل، في محاولة لتحسين القوة التفجيرية للقنابل. ثم في عام 1943، استُدعي إلى موسكو. لقد أصبح من الواضح - كما أبلغا- أن كلاً من الأمريكيين والألمان يكتفون جهودهم لصنع قنبلة ذرية. كان من المقرر أن يكونا جزءاً من النخبة في أثناء جهود تطوير قنبلة سوفيتية صغيرة تحت قيادة إيجور كورتشاتوف.

وبعد مرور عامين، عندما قصف الأمريكيون هيروشيما وناجازاكي، كان فريق كورتشاتوف قد طور فهمًا نظريًا شاملاً للمفاعلات النووية لصنع البلوتونيوم 239، وطور العديد من التصميمات المحتملة للقنابل - وأصبح خاريتون وزيلدوفيش المنظرين الرئيسيين للمشروع.

لما علم ستالين بتفجيرات القنبلة الذرية الأمريكية، وبُخ كورتشاتوف بغضب بسبب بطء الفريق السوفيتي. دافع كورتشاتوف عن فريقه قائلاً: وسط الدمار الذي خلفته الحرب، ومع الموارد المحدودة، لم يتمكن الفريق من التحرك بسرعة أكبر. أخبره ستالين بغضب أن الطفل إذا لم يبك، فإن أمه لا تستطيع أن تعرف ما يحتاج إليه. وأمر، اطلب أي شيء تحتاج إليه، ولن يرفض أي شيء؛ ثم طالب بعد ذلك بمشروع مكثف غير محظور لصنع القنبلة، وهو مشروع يخضع للسلطة المطلقة للفرقة الأولى بافلوفيتش بيريا، الرئيس المخيف للشرطة السرية.

من الصعب تخيل حجم الجهد الذي بذله بيريا. لقد أجبر ملايين المواطنين السوفيت من معسكرات اعتقال ستالين على العمل القسري. بنى هؤلاء (زيكس zeks) - كما كان يطلق

عليهم بالعامية- مناجم اليورانيوم، ومصانع تنقية اليورانيوم، والمفاعلات النووية، ومراكز الأبحاث النظرية، ومراكز اختبار الأسلحة، ومدناً صغيرة قائمة بذاتها لدعم هذه المرافق. كانت المرافق المنتشرة في جميع أنحاء البلاد محاطة بمستويات من الأمن لم يسمع بها من قبل في مشروع مانهاتن الأمريكي. نُقل زيلدوفيش وخاريتون إلى أحد هذه المرافق، في «مكان بعيد»، والذي كان الكشف عن موقعه -على الرغم من أنه معروف بشكل شبه مؤكد للسلطات الغربية في أواخر الخمسينيات- محظوراً للمواطنين السوفييت حتى عام 1990¹. كانت المنشأة معروفة ببساطة مثل الشيء Obyekt «التثبيت»؛ أصبح خاريتون مديراً لها، وزيلدوفيش قائداً لإحدى فرق تصميم القنابل الرئيسية. وتحت سلطة بيريا، أنشأ كورتشاتوف عدة فرق من الفيزيائيين لمتابعة كل جانب من جوانب مشروع القنبلة، بالتوازي وبشكل مستقل تماماً؛ التكرار يجلب الأمن. غَدَّت الفرق في التثبيت الفرق الأخرى بمشكلات التصميم، بما في ذلك فريق صغير بقيادة ليف لاندوا في معهد المشكلات الفيزيائية في موسكو.

وبينما كانت هذه الجهود الضخمة تتقدم بلا هوادة، كان الجواسيس السوفييت يحصلون، من خلال كلاوس فوكس (الفيزيائي البريطاني الذي عمل في مشروع القنبلة الأمريكية)، على تصميم القنبلة الأمريكية القائمة على البلوتونيوم. لقد اختلف إلى حد ما عن التصميم الذي أنتجه زيلدوفيش وزملاؤه، لذلك واجه كورتشاتوف وخاريتون ورفاقهما قراراً صعباً: لقد تعرضوا لضغوط شديدة من ستالين وبيريا للحصول على النتائج، وكانوا يخشون عواقب اختبار القنبلة غير الناجح. في عصر كان فيه الفشل يعني الإعدام في كثير من الأحيان؛ كانوا يعلمون أن التصميم الأمريكي نجح في ألأموجوردو وناجازاكي، لكنهم لم يكونوا متأكدين تماماً من تصميمهم؛ وكان لديهم ما يكفي من البلوتونيوم لصنع قنبلة واحدة فقط. كان القرار واضحاً ولكنه مؤلم: فقد أوقفوا تصميمهم الخاص 2 وحولوا برنامجهم المكثف إلى التصميم الأمريكي.

أخيراً، في 29 أغسطس 1949 -بعد أربع سنوات من الجهود الحثيثة، والبؤس الذي لا يوصف، والوفيات التي لا تحصى من الزيكس العمال-العبيد، وبداية تراكم النفقات من المفاعلات النووية بالقرب من تشيلياينسك التي ستنفجر بعد عشر سنوات، وتلوث مئات الأميال المربعة في جوار المدينة -وصل البرنامج المكثف إلى مرحلة التنفيذ. فُجرت أول قنبلة ذرية سوفييتية بالقرب من سيمييلاتينسك في آسيا السوفييتية، في اختبار شهدته القيادة العليا للجيش السوفييتي وقادة الحكومة.

في 3 سبتمبر 1949، اكتشفت طائرة استطلاع جوية أمريكية من طراز WB-29، في أثناء رحلة روتينية من اليابان إلى ألاسكا، منتجات الانشطار النووي من التجربة السوفيتية. قدمت البيانات إلى لجنة من الخبراء، بما في ذلك أوبنهايمر، لتقييمها. وكان الحكم لا شك فيه. لقد اختبر الروس قنبلة ذرية!

وفي خضم الذعر الذي أعقب ذلك (ملاحئ القنابل في الأفنية الخلفية للمنازل؛ تدريبات القنبلة الذرية لأطفال المدارس؛ «مطاردة الساحرات» التي قام بها مكارثي لاجتثاث الجواسيس والشيوعيين ورفاقهم شُذاذ الآفاق من الحكومة والجيش ووسائل الإعلام والجامعات)، حدث نقاش عميق بين الفيزيائيين والسياسيين. دعا إدوارد تيلر -أحد أكثر علماء الفيزياء الأمريكيين ابتكارًا في مجال تصميم القنبلة الذرية- إلى برنامج مكثف لتصميم وبناء «القنبلة الفائقة» (أو «القنبلة الهيدروجينية») -وهو سلاح يعتمد على اندماج أنوية الهيدروجين لتكوين الهيليوم. إذا أمكن صناعة القنبلة الهيدروجينية فستكون رائعة. يبدو أن لا حد لقوتها. هل أراد الإنسان قنبلة أقوى بعشر مرات من قنبلة هيروشيما؟ مائة مرة أقوى؟ ألف؟ مليون؟ ما دامت صناعة قنبلة أمكنت من البداية، يمكن جعلها قوية بقدر المستطاع.

أيّد جون ويلر رأي تيلر: اعتقد أن وجود برنامج مكثف لـ«الفائقة» أصبح ضروريًا لمواجهة التهديد السوفيتي. روبرت أوبنهايمر ولجنته الاستشارية العامة لهيئة الطاقة الذرية الأمريكية عارضوا ذلك. لم يكن من الواضح على الإطلاق ما إذا كان من الممكن جعل القنبلة الفائقة -كما صُورت آنذاك- قادرة على العمل أم لا، هكذا جادل أوبنهايمر ولجنته. بالإضافة إلى ذلك، حتى لو نجح الأمر، فإن أي قنبلة فائقة هي بالضرورة أقوى كثيرًا من القنبلة الذرية العادية، من المرجح أن تكون ثقيلة جدًا بحيث لا يمكن إطلاقها بالطائرة أو الصاروخ. ثم كانت هناك القضايا الأخلاقية التي تناولها أوبنهايمر ولجنته على النحو التالي. «إننا نبني توصياتنا [ضد البرنامج السريع] بسبب اعتقادنا أن المخاطر الشديدة على البشرية الكامنة في الاقتراح تفوق تمامًا أي ميزة عسكرية يمكن أن تأتي من هذا التطور. فليكن واضحًا أن هذا سلاح خارق؛ إنها فئة مختلفة تمامًا عن القنبلة الذرية. والسبب في تطوير مثل هذه القنابل الفائقة هو أن تكون لديها القدرة على تدمير مساحة واسعة بقنبلة واحدة. واستخدامها سينطوي على اتخاذ قرار بذبح عدد كبير من المدنيين. إننا نشعر بالقلق إزاء الآثار العالمية المحتملة للنشاط الإشعاعي الناتج عن انفجار عدد

قليل من القنابل الفائقة ذات الحجم الذي يمكن تصوره. إذا نجحت القنابل الفائقة بأي شكل، فلن يكون هناك حد أساسي للقوة التدميرية التي يمكن أن تتحقق باستخدامها. ولذلك، فإن القنبلة الفائقة قد تصبح سلاحًا للإبادة الجماعية».

بالنسبة إلى إدوارد تيلر وجون ويلر، لم تكن هذه الحجج منطقية على الإطلاق. من المؤكد أن الروس سوف يملكون قدمًا في إنتاج القنبلة الهيدروجينية؛ كانوا يعتقدون أنه إذا لم تمض أمريكا قدمًا أيضًا، فإن العالم الحر قد يتعرض لخطر هائل.

سادت وجهة نظر تيلر-ويلر. في 10 مارس 1950، أمر الرئيس ترومان ببرنامج مكثف لتطوير الفائقة.

يبدو أن التصميم الأمريكي للفائقة في عام 1949 كان بمثابة وصفة للفشل، تمامًا كما توقعت لجنة أوبنهايمر. ومع ذلك، نظرًا لأنه لم يكن من المؤكد فشله، وبما أنه لم يكن هناك شيء أفضل منه، تُوبع بشكل مكثف حتى مارس 1951، عندما اخترع تيلر وستانيسلو أولام تصميمًا جديدًا جذريًا، بدا واعدًا للغاية.

كان اختراع تيلر-أولام في البداية مجرد فكرة لتصميم ما. وكما قال هانز بيث: «تسع من كل عشر أفكار لتيلر عديمة الفائدة. إنه يحتاج إلى رجال أكثر حكمة، حتى لو كانوا أقل موهبة، لاختيار الفكرة العاشرة، والتي غالبًا ما تكون ضربة عبقرية. لاختبار ما إذا كانت تلك الفكرة عبقرية أو خادعة، تطلب الأمر تحويلها إلى تصميم ملموس ومفصل للقنبلة، ثم إجراء حسابات مكثفة على أكبر أجهزة الحاسوب المتاحة لمعرفة ما إذا كان التصميم قد ينجح، وبعد ذلك، اختبار الحسابات إذا كان مقدراً لها النجاح ثم بناء واختبار قنبلة فعلية.

تشكل فريقان لإجراء الحسابات: أحدهما في لوس ألamos، والآخر في جامعة برينستون. قاد جون ويلر فريق برينستون. عمل فريق ويلر ليلاً ونهاراً لعدة أشهر لتطوير تصميم كامل للقنبلة استنادًا إلى فكرة تيلر-أولام، واختبار مدى نجاحها باستخدام حسابات الحاسوب. وكما يتذكر ويلر: «لقد قمنا بقدر هائل من الحسابات. كنا نستخدم الحواسيب المتاحة في نيويورك وفيلادلفيا وواشنطن، وهي في الواقع جزء كبير جدًا من قدرات الحواسيب في الولايات المتحدة. لقد عمل لاري ويليس، وجون تول، وكين فورد، ولفايس هيني، وكارل هاوسمان، وديك أوليفيه، وآخرون ثلاث فترات تمتد كل منها ست ساعات كل يوم لإنجاز الأمور».

عندما أوضحت الحسابات أن فكرة تيلر-أولام قد تنجح، عقد اجتماعاً في معهد الدراسات المتقدمة في برينستون (حيث كان أوبنهايمر مديراً)، لعرض الفكرة على اللجنة الاستشارية العامة لأوبنهايمر والمؤسسة الأم في الولايات المتحدة، وهي هيئة الطاقة الذرية. وصف تيلر الفكرة، ثم وصف ويلر التصميم المحدد لفريقه والانفجار المتوقع. يتذكر ويلر قائلاً: «بينما أبدأ بإلقاء محاضرتي، اندفع كين فورد من الخارج نحو النافذة، ورفعها، ومرر هذا الرسم البياني الكبير. فتحته ووضعته على الحائط. لقد أظهر التقدم المحرز في الاحتراق النووي الحراري [كما حسبناه]... لم يكن أمام اللجنة خيار سوى استنتاج أن هذا الشيء منطقي... حساباتنا قلبت أوبي رأساً على عقب في المشروع».



جزء من فريق تصميم القنبلة الهيدروجينية التابع لجون ويلر في جامعة برينستون عام 1952. الصف الأمامي، من اليسار إلى اليمين: مارجريت فيلوز، مارجريت موراي، دوروثيا ريفيل، أودري أوجالا، كريستين شاك، روبرتا كيسي. الصف الثاني: والتر آرون، ويليام كليندينين، سولومون بوشنر، جون تول، جون ويلر، كينيث فورد. الصف الثالث والرابع: ديفيد لايزر، لورانس ويليتس، ديفيد كارتر، إدوارد فريمان، جاي بيرجر، جون ماكلنتوش، رالف بيننجتون، غير معروف، روبرت جويرس. [تصوير هوارد شريدر؛ إهداء لورانس ويليتس وجون ويلر].

لقد وصف أوبنهايمر رد فعله: «كان البرنامج الذي لدينا في عام 1949 [«الوصفة الطبية للفشل»] أمرًا معذبًا، يمكنك القول إنه لم يكن له قدر كبير من الحس التقني. لذلك من الممكن القول أيضًا إنك لا تريد ذلك حتى لو أن بإمكانك الحصول عليه. أما البرنامج في عام 1952 [التصميم الجديد المبني على فكرة تيلر-أولام] لطيف من الناحية التقنية، لدرجة أنك لا تستطيع الجدال حوله». أصبحت المشكلات عسكرية وسياسية وإنسانية بحثة تتعلق بما ستفعله حيال ذلك بمجرد التحصل عليه. في محاولة لقمع مخاوفه العميقة بشأن القضايا الأخلاقية، وحّد أوبنهايمر، جنبًا إلى جنب عدد من الأعضاء الآخرين في لجنته، الصفوف مع تيلر وويلر ومؤيدي القنبلة الفائقة، وتقدم المشروع للأمام بوتيرة متسارعة لبناء واختبار القنبلة. لقد نجح الأمر كما تنبأت به الحسابات المشتركة لفريق ويلر وفريق متعاون في لوس ألamos.

كتبت حسابات التصميم الشاملة لفريق ويلر في النهاية تحت اسم التقرير السري تقرير مشروع مانهورون القسم ب 31 أو PMB-31. يقول ويلر: «لقد قيل لي إن PMB-31 كان لمدة عشر سنوات على الأقل هو الكتاب المقدس لتصميم الأجهزة النووية الحرارية» (القنابل الهيدروجينية).

في الفترة من 1949 إلى 1950، بينما كانت أمريكا في حالة من الذعر، وكان أوبنهايمر وتيلر وآخرون يناقشون ما إذا كان ينبغي لأمريكا أن تنفذ برنامجًا مكثفًا لتطوير القنبلة الفائقة، كان الاتحاد السوفييتي بالفعل في خضم مشروع قنبلة خارقة لقواته ينفذها لصالحه.

في ربيع عام 1948؛ أي قبل خمسة عشر شهرًا من أول اختبار سوفييتي للقنبلة الذرية، أجرى زيلدوفيش وفريقه في المنشأة حسابات نظرية على تصميم قنبلة فائقة مشابه لـ «وصفة الفشل» الأمريكية. تكوّن فريق القنبلة الفائقة في موسكو تحت قيادة إيجور تام، أحد أبرز علماء الفيزياء النظرية السوفييتية. وكان أعضاؤه فيتالي جينزبرج (الذي سنسمع عنه الكثير في الفصلين الثامن والعاشر)، وأندريه ساخاروف (الذي أصبح منشقًا في السبعينيات، ثم بطلاً وقديسًا سوفييتيًا في أواخر الثمانينيات والتسعينيات)، وسيمون بيلينكي، ويوري رومانوف. لقد كُلف فريق تام بمهمة فحص وتحسين حسابات التصميم الخاصة بفريق زيلدوفيش.

ويتجسد موقف فريق تام تجاه هذه المهمة في تصريح بيلينكي في ذلك الوقت: «مهمتنا هي لعق فتحة شرح زيلدوفيش». لم يكن زيلدوفيش، بمزجه المتناقض بين الشخصية القوية والمتطلبة والخبيل السياسي الشديد، من بين أكثر الفيزيائيين السوفيت شهرة. لكنه كان من بين الأكثر تألقاً. لاندau، الذي كان كقائد لفريق تصميم فرعي صغير يتلقى أحياناً أوامر من فريق زيلدوفيش لتحليل هذا أو ذاك أو جانب آخر من تصميم القنبلة، كان يشير إليه أحياناً خلف ظهره باسم «تلك العاهرة، زيلدوفيش». على النقيض من ذلك، كان زيلدوفيش يقدس لاندau باعتباره قاضياً عظيماً على صحة أفكار الفيزياء، وباعتباره أعظم معلم له - على الرغم من أن زيلدوفيش لم يتلقَ منه أي دورات تدريسية رسمية.

لم يستغرق الأمر سوى بضعة أشهر حتى توصل ساخاروف وجينزبرج - من فريق تام - إلى تصميم أفضل بكثير لقنبلة فائقة من «وصفة الفشل» التي كان زيلدوفيش والأمريكيون يتبعونها. اقترح ساخاروف بناء القنبلة على شكل كعكة ذات طبقات من قذائف متناوبة من الوقود الانشطاري الثقيل (اليورانيوم) ووقود الاندماج الخفيف، واقترح جينزبرج ووقود الاندماج النووي ديوتريد الليثيوم (LiD). في الانفجار الشديد للقنبلة، سوف تنشطر نواة الليثيوم الخاصة بـLiD إلى أنوية التريتيوم والهيليوم، ثم يندمج التريتيوم مع الديوتيريوم الموجود في LiD لتكوين أنوية الهيليوم، مما يؤدي إلى إطلاق كميات هائلة من الطاقة. من شأن اليورانيوم الثقيل أن يقوي الانفجار من خلال منع طاقته من التسرب بسرعة كبيرة، ومن خلال المساعدة في ضغط الوقود الاندماجي، ومن خلال إضافة الطاقة الانشطارية إلى الاندماج. عندما طرح ساخاروف هذه الأفكار، أدرك زيلدوفيش أنها واعدة على الفور. وسرعان ما أصبحت كعكة ساخاروف ذات الطبقات وكعكة LiD إنتاج جينزبرج محور جهود القنبلة السوفييتية الفائقة.

ولدفع القنبلة الفائقة إلى الأمام بسرعة أكبر، أمر بنقل ساخاروف وتام وبيلينكي ورومانوف من موسكو إلى المنشأة. ولكن ليس جينزبرج. يبدو السبب واضحاً: قبل ثلاث سنوات، تزوج جينزبرج نينا إيفانوفنا، وهي امرأة مرحة ورائعة، سُجنَت في أوائل الأربعينيات بتهمة ملفقة بالتخطيط لقتل ستالين. من المفترض أنها وزملاءها المتأمرين كانوا يخططون لإطلاق النار على ستالين من نافذة الغرفة التي تعيش فيها، في أثناء مروره في شارع أرباب أسفل منهم. عندما اجتمعت لجنة التروিকা من القضاة لتقرير مصيرها، ظهرت إشارة إلى أن غرفتها لم يكن بها أي نوافذ على الإطلاق تطل على شارع أرباب،

لذلك في عرض غير عادي للرحمة، نجت حياتها؛ لقد حُكم عليها فقط بالسجن ثم بالنفي، وليس بالإعدام. من المفترض أن سجنها ونفيها كانا كافيين لتلويث جينزبرج، مخترع وقود LiD للقبلة، وإبعاده عن الشيء. كان جينزبرج سعيدًا، لقد فضّل أبحاث الفيزياء الأساسية على تصميم القنابل، وحصد عالم العلوم الثمار: فبينما ركز زيلدوفيش وساخاروف وويلر على القنابل، حل جينزبرج لغز كيفية انتشار الأشعة الكونية عبر مجرتنا، ومع لاندوا استخدم قوانين الميكانيكا الكمومية لشرح أصل التوصيلية الفائقة.

في عام 1949، عندما حصد مشروع القبلة الذرية السوفيتية ثماره، أمر ستالين بتحويل الموارد الكاملة للدولة السوفيتية -من دون راحة- إلى جهود صنع القبلة الفائقة. عبودية الزيكس، ومرافق البحث النظرية، ومرافق التصنيع، ومرافق الاختبار، والفرق المتعددة من الفيزيائيين في كل جانب من جوانب التصميم والبناء، كلها يجب أن تركز على محاولة التفوق على الأمريكيين في القبلة الهيدروجينية. ولم يعرف الأمريكيون شيئًا عن هذا، في خضم جدلهم حول ما إذا كان يجب عليهم القيام بجهد مكثف لصناعة الفائقة. ومع ذلك، كان لدى الأمريكيين تكنولوجيا متفوقة وبداية كبيرة.

في الأول من نوفمبر عام 1952، فجّر الأمريكيون قبلة هيدروجينية تحمل الاسم الرمزي مايك. صُممت مايك لاختبار اختراع تيلر-أولام عام 1951 واستندت إلى حسابات التصميم لفريق ويلر والفريق المتعاون في لوس ألاموس. واستخدم الديوتيريوم السائل كوقود رئيسي. يتطلب تسهيل الديوتيريوم وتوجيهه إلى منطقة الانفجار جهازًا ضخمًا يشبه أجهزة المصانع. وبالتالي، لم يكن هذا هو نوع القبلة التي يمكن إطلاقها على متن أي طائرة أو صاروخ. ومع ذلك، فقد دمرت بالكامل جزيرة إلوجلاب في سلسلة جزر آتول إنيويتوك في المحيط الهادئ؛ وكانت أقوى بـ 800 مرة من القبلة التي قتلت أكثر من 100 ألف شخص في هيروشيما.

في 5 مارس 1953، وسط موسيقى حزينة، أعلنت إذاعة موسكو وفاة جوزيف ستالين. كان هناك ابتهاج في أمريكا، وحزن في الاتحاد السوفيتي. كتب أندريه ساخاروف إلى زوجته كلافيا: «أنا تحت تأثير وفاة رجل عظيم. أفكر في إنسانيته».

في 12 أغسطس 1953، في سيميپالاتينسك، فجّر السوفييت قبلتهم الهيدروجينية الأولى. أطلق عليها الأمريكيون اسم جو-4، واستُخدم تصميم ساخاروف على شكل

كعكة متعددة الطبقات ووقود الاندماج النووي LiD من جينزبرج، وكانت صغيرة بما يكفي لنقلها على متن طائرة. ومع ذلك، لم يشتعل الوقود في جو - 4 بطريقة تيلر-أولام، ونتيجة لذلك كانت جو - 4 أقل قوة من مايك الأمريكي: كانت «فقط» قرابة 30 قدر قنبلة هيروشима، مقارنة بمايك التي تساوي 800.

في الواقع، بلغة علماء فيزياء القنبلة الأمريكية، لم تكن جو-4 قنبلة هيدروجينية على الإطلاق، لقد كانت قنبلة ذرية معززة؛ أي قنبلة ذرية عززت قوتها بإضافة بعض الوقود الاندماجي. كانت مثل هذه القنابل الذرية المعززة بالفعل جزءاً من الترسانة الأمريكية، ورفض الأمريكيون اعتبارها قنابل هيدروجينية، لأن تصميمها على شكل كعكة متعددة الطبقات لم يمكنها من إشعال كمية كبيرة بشكل عشوائي من الوقود الاندماجي. ولم تكن هناك طريقة باستخدام هذا التصميم لصنع «سلاح يوم القيامة» أقوى بآلاف المرات من هيروشима.

لكن قنبلة بقدرة 30 هيروشима لم يكن إطلاقها على متن صاروخ، ولم يكن من الممكن نقلها بالطائرة. كانت جو - 4 سلاحاً رائعاً بالفعل، وتنفس ويلر وغيره من الأمريكيين الصعداء لأن الزعيم السوفييتي الجديد جورجي مالينكوف، بفضل قنبلته الفائقة الحقيقية، لن يتمكن من تهديد أمريكا بها.

في الأول من مارس عام 1954، فجّر الأمريكيون أول قنبلة فائقة تعمل بوقود LiD. كان اسمها الرمزي برافو، ومثل مايك، اعتمدت على حسابات التصميم التي أجراها فريقا ويلر ولوس ألاموس واستخدمت اختراع تيلر-أولام.

كانت الطاقة الانفجارية 1300 قدر هيروشима.

في مارس 1954، اخترع ساخاروف وزيلدوفيش بشكل مشترك (وبشكل مستقل عن الأمريكيين) فكرة تيلر-أولام، وفي غضون بضعة أشهر ركزت الموارد السوفييتية على تنفيذها في قنبلة خارقة حقيقية، يمكن أن تكون لها قوة تدميرية كبيرة مثل القنبلة النووية التي قد يرغب أي شخص في امتلاكها. استغرق الأمر ثمانية عشر شهراً فقط لتصميم القنبلة وتصنيعها بالكامل. وفي 23 نوفمبر 1955، فُجرت بقوة انفجارية تساوي 300 هيروشима.

وكما اشتبهت اللجنة العامة لأوبنهايمر، في معارضتها لبرنامج الفائقة، فإن هذه القنابل هائلة القوة -والسلاح الضخم الذي يعادل 5000 هيروشима الذي فجّره السوفييت لاحقاً في محاولة لتخويف جون كينيدي- لم تكن جذابة جداً للمؤسسات العسكرية، سواء

الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي. الأسلحة الموجودة حالياً في الترسانات الروسية والأمريكية تبلغ نحو 30 هيروشيما، وليس الآلاف. وعلى الرغم من أنها قنابل هيدروجينية حقيقية، فإنها ليست أقوى من قنبلة ذرية كبيرة. لم يكن الجيش بحاجة إلى جهاز «يوم القيامة» أو حتى يرغب فيه. إن الاستخدام الوحيد لمثل هذا الجهاز هو التهيب النفسي للخصم، ولكن هذا التهيب يمكن أن يكون خطيراً في عالم له قادة مثل جوزيف ستالين. في الثاني من يوليو عام 1953، أصبح لفائس شتراوس -عضو لجنة الطاقة الذرية الذي خاض معركة مريرة مع أوبنهايمر بشأن البرنامج المكثف للطاقة الذرية- رئيساً للجنة. وكأحد أعماله الأولى في السلطة، أمر بإزالة جميع المواد السرية من مكتب أوبنهايمر في برينستون. كان شتراوس والعديد من الأشخاص الآخرين في واشنطن متشككين بشدة في ولاء أوبنهايمر. فكيف يمكن لرجل مخلص لأمريكا أن يعارض جهد الفائقة، كما فعل قبل أن يثبت فريق ويلر أن اختراع تيلر-أولام سينجح؟ أرسل ويليام بوردن، الذي كان كبير مستشاري اللجنة المشتركة للطاقة الذرية التابعة للكونجرس خلال المناظرة الكبرى، رسالة إلى إدجار هوفر يقول فيها، جزئياً: «الغرض من هذه الرسالة هو إبداء رأيي المدروس بشكل شامل، استناداً إلى سنوات من دراسة الأدلة السرية المتاحة، تشير على الأرجح إلى أن روبرت أوبنهايمر هو عميل للاتحاد السوفيتي». أُلغى التصريح الأمني لأوبنهايمر، وفي أبريل ومايو من عام 1954، بالتزامن مع الاختبارات الأمريكية الأولى للقنابل الهيدروجينية التي يمكن حملها جواً، عقدت لجنة الطاقة الذرية جلسات استماع لتحديد ما إذا كان أوبنهايمر يمثل بالفعل خطراً أمنياً أم لا.

6.2 الإطار

لماذا صنع الفيزيائيون السوفييت القنبلة لتالين؟

لماذا بذل زيلدوفيش، وساخاروف، وغيرهما من علماء الفيزياء السوفييت العظماء قصارى جهدهم لبناء قنابل ذرية وقنابل هيدروجينية لجوزيف ستالين؟ كان ستالين مسؤولاً عن مقتل الملايين من المواطنين السوفييت: 6 ملايين أو 7 ملايين فلاح وكولاك في التجميع القسري في أوائل ثلاثينيات القرن العشرين، و 2.5 مليون من أعلى طبقات الجيش والحكومة والمجتمع في الإرهاب الكبير في 1937-1939. 10 ملايين من جميع

طبقات المجتمع في السجون ومعسكرات العمل في الثلاثينيات وحتى الخمسينيات. كيف يمكن لأي فيزيائي، بضمير حي، أن يضع السلاح النهائي في يدي رجل شرير كهذا؟ أولئك الذين يطرحون مثل هذه الأسئلة ينسون أو لا يعرفون الظروف -الجسدية والنفسية- التي سادت الاتحاد السوفيتي في أواخر الأربعينيات وأوائل الخمسينيات من القرن الماضي:

1. كان الاتحاد السوفيتي قد خرج للتو من الحرب الأكثر دموية وتدميرًا في تاريخه -الحرب التي قتلت فيها ألمانيا، المعتدي، 27 مليون سوفيتي وألحقت الدمار بوطنهم- عندما أطلق ونستون تشرشل رصاصة الحرب الباردة مبكرًا: في خطاب ألقاه في فولتون بولاية ميسوري في 5 مارس 1946، حذر تشرشل الغرب من التهديد السوفيتي وصاغ عبارة «الستار الحديدي» لوصف الحدود التي وضعها ستالين حول إمبراطوريته. استغلت آلة ستالين الدعاية خطاب تشرشل بكل ما في وسعها، الأمر الذي خلق خوفًا عميقًا بين المواطنين السوفيت من احتمال هجوم البريطانيين والأمريكيين. وزعمت الدعاية اللاحقة أن الأمريكيين كانوا يخططون لحرب نووية ضد الاتحاد السوفيتي*، باستخدام مئات القنابل الذرية، التي تحملها الطائرات، وتستهدف مئات المدن السوفيتية. صدّق معظم الفيزيائيين السوفيت هذه الدعاية وقبلوا الضرورة المطلقة التي مفادها أن على الاتحاد السوفيتي إنشاء أسلحة نووية للحماية من تكرار الدمار الذي أحدثه هتلر.

2. كانت آلية دولة ستالين فعالة للغاية في السيطرة على المعلومات وفي غسل أدمغة كبار العلماء، حتى إن القليل منهم فهم شر الرجل. حظي ستالين بتبجيل معظم الفيزيائيين السوفيت (حتى ساخاروف)، كما هي حال معظم المواطنين السوفيت، باعتباره القائد العظيم -وهو الدكتاتور القاسي الخيّر، كان العقل المدبر للانتصار على ألمانيا وسيحمي شعبه ضد عالم معاد. أدرك الفيزيائيون السوفيت بشكل مخيف أن الشر ينتشر في المستويات الأدنى من الحكومة: إن الإدانات الهشة من قبل شخص بالكاد يعرفه المرء يمكن أن ترسله إلى السجن، وفي كثير من الأحيان إلى الموت. (في أواخر الستينيات، ذكر لي زيلدوفيش كيف كان الأمر: «الحياة رائعة جدًا الآن، لم يعد يأتي الطرُق في منتصف الليل، ولم يعد الأصدقاء يختفون، ولا نسمع عنهم شيئًا بعدها»). لكن مصدر هذا الشر، كما يعتقد معظم الفيزيائيين،

لا يمكن أن يكون القائد العظيم؛ يجب أن يكون الآخرين تحته. (كان لاندau أكثر وعياً؛ فقد تعلم الكثير في السجن. ولكن بسبب الدمار النفسي الذي لحق به بسبب سجنه، نادرًا ما تحدث عن شر ستالين، ولما فعل، لم يصدقه أصدقاؤه).

3. على الرغم من أن المرء يعيش حياة من الخوف، فإن المعلومات خضعت لرقابة مشددة، لدرجة أنه لا يمكن للمرء أن يستنتج فداحة الخسائر التي تكبدها ستالين. ولن تصبح هذه الحصيلة معروفة إلا في عصر الجلاسnost في عهد جورباتشوف، في أواخر الثمانينيات.

4. كان العديد من علماء الفيزياء السوفييت «قدرين». لم يفكروا في هذه القضايا على الإطلاق. الحياة صعبة للغاية لدرجة أن المرء يكافح من أجل الاستمرار، والقيام بعمله بأفضل ما يستطيع، مهما كان. بالإضافة إلى ذلك، كان التحدي التقني المتمثل في اكتشاف كيفية صنع قنبلة فعالة أمرًا رائعًا، وكان هناك بعض الفرح في الصداقة الحميمة بين فريق التصميم والهيئة والراتب الكبير الذي يجلبه عمل الشخص (*).

كان ويلر في واشنطن في مهام أخرى وقت جلسات الاستماع. لم يكن متورطًا بأي شكل. ومع ذلك، ذهب تيلر، وهو صديق شخصي مقرب، إلى غرفة ويلر في الفندق في الليلة السابقة للإدلاء بشهادته، وظلا يذرعان الأرض لساعات. إذا قال تيلر ما يعتقد حقا، فسيلحق ذلك ضررًا كبيرًا بأوبنهايمر. ولكن كيف لا يقول؟ لم يكن لدى ويلر أي شك؛ ومن وجهة نظره، فإن نزاهة تيلر ستجبره على الإدلاء بشهادته بشكل كامل.

وكان ويلر على حق. في اليوم التالي، قال تيلر، متبنيًا وجهة نظر يفهمها ويلر: «في عدد كبير من الحالات رأيت الدكتور أوبنهايمر يتصرف... بطريقة كان من الصعب للغاية بالنسبة إليّ أن أفهمها. واختلفت معه تمامًا في كثير من الأمور، وبدت لي تصرفاته بصراحة مشوشة ومعقدة. إلى هذا الحد أشعر أنني أرغب في رؤية المصالح الحيوية للبلاد في يد

(*) بدءًا من عام 1945، كان التخطيط الاستراتيجي الأمريكي يتضمن بالفعل خيارًا - إذا بدأ الاتحاد السوفيتي حربًا تقليدية - لشن هجوم نووي واسع النطاق على المدن السوفيتية وعلى الأهداف العسكرية والصناعية؛ انظر براون (1978).

من أفهمه بشكل أفضل، وبالتالي أثق بهم أكثر... أعتقد، وهذه مجرد مسألة اعتقاد وليس هناك أي خبرة أو معلومات حقيقية خلف ذلك، إن شخصية الدكتور أوبنهايمر هي من النوع الذي يجعله لا يفعل عن علم أو عن طيب خاطر أي شيء يهدف إلى تعريض سلامة الدولة للخطر. وبالتالي، بقدر ما يكون سؤالك موجهًا نحو النية، أود أن أقول إنني لا أرى أي سبب لرفض الموافقة. إذا كان الأمر يتعلق بالحكمة والحكم، كما أظهرت الإجراءات منذ عام 1945، فسأقول إنه سيكون من الحكمة عدم منح التصريح».

كان جميع الفيزيائيين الآخرين تقريبًا الذين أدلوا بشهاداتهم واضحين في دعمهم لأوبنهايمر، وكانوا مدعورين من شهادة تيلر. على الرغم من ذلك، وعلى الرغم من غياب الأدلة الموثوقة على أن أوبنهايمر كان «عميلًا للاتحاد السوفيتي»، فقد ساد مناخ العصر: أعلن أن أوبنهايمر يشكل خطرًا أمنيًا وحرّم من استعادة تصريحه الأمني.

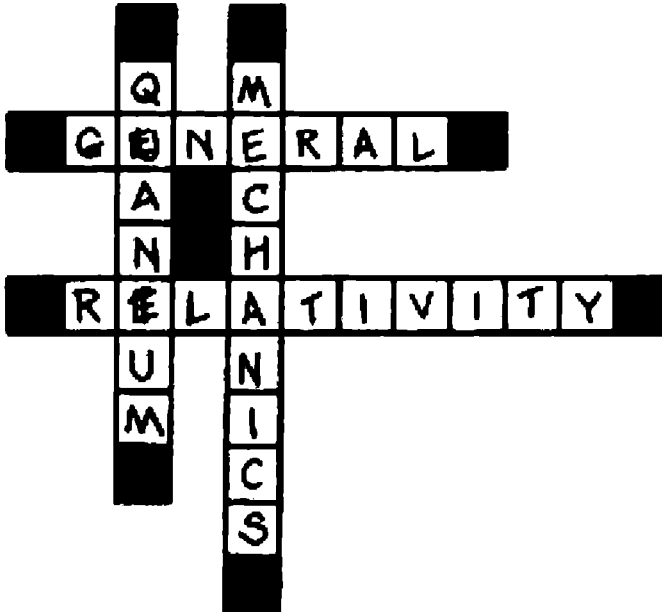
بالنسبة إلى معظم الفيزيائيين الأمريكيين، أصبح أوبنهايمر شهيدًا على الفور، وتيلر شريرًا على الفور. سينبذ مجتمع الفيزياء تيلر لبقية حياته. لكن بالنسبة إلى ويلر، كان تيلر هو الشهيد: يعتقد ويلر أن تيلر «كانت لديه الشجاعة للتعبير عن حكمه الصادق، ووضع أمن بلاده قبل تضامن مجتمع الفيزيائيين». ومن وجهة نظر ويلر، فإن مثل هذه الشهادة «تستحق الاهتمام»، وليس النبذ. وبعد خمسة وثلاثين عامًا، سيتفق أندريه ساخاروف على ذلك⁴.

ولادة الثقب الأسود: فهم أعمق

لم يقتصر الاختلاف العميق بين ويلر وأوبنهايمر بشأن قضايا الأمن القومي فحسب، بل اختلفا أيضًا بشكل عميق في نهجهما تجاه الفيزياء النظرية. بينما التزم أوبنهايمر بشكل ضيق بتنبؤات القانون الفيزيائي الراسخ، كان ويلر مدفوعًا بتوق عميق لمعرفة ما يكمن وراء القانون الراسخ. لقد كان يتجه ذهنيًا باستمرار نحو المجال الذي تنهار فيه القوانين المعروفة وتظهر قوانين جديدة. لقد حاول أن يشق طريقه إلى القرن الحادي والعشرين، لإلقاء نظرة على ما قد تكون عليه قوانين الفيزياء خارج حدود القرن العشرين.

من بين جميع الأماكن التي يمكن أن تكون فيها هذه اللمحة، لم يكن أي منها يبدو واعدًا بالنسبة إلى ويلر، منذ الخمسينيات فصاعدًا، بعد التشابك بين النسبية العامة (مجال الأجسام الكبير) والميكانيكا الكمومية (مجال الأجسام الصغيرة). النسبية العامة

والميكانيكا الكمومية لم تتشابك إحداهما مع الأخرى بطريقة متسقة منطقيًا. لقد كانتا مثل صفوف وأعمدة لغز الكلمات المتقاطعة في وقت مبكر من محاولات المرء لحلها. لدى المرء مجموعة مؤقتة من الكلمات المكتوبة على الصفوف ومجموعة مؤقتة مكتوبة على الأعمدة، ويكتشف المرء تناقضًا منطقيًا في بعض تقاطعات الصفوف والأعمدة: حين تتطلب كلمة GENERAL في الصف حرف E، تتطلب كلمة QUANTUM في العمود حرف U؛ حين تتطلب كلمة الصف RELATIVITY حرف E، تتطلب كلمة العمود QUANTUM حرف T. وبالنظر إلى الصف والعمود، من الواضح أنه يجب تغيير أحدهما أو الآخر أو كليهما للحصول على الاتساق. وبالمثل، عند النظر إلى قوانين النسبية العامة وقوانين الميكانيكا الكمومية، من الواضح أنه يجب تغيير إحداهما أو الأخرى أو كليهما لجعلهما مترابطتين منطقيًا. إذا أمكن تحقيق مثل هذه الشبكة، فإن الاتحاد الناتج بين النسبية العامة والميكانيكا الكمومية من شأنه أن ينتج مجموعة جديدة قوية من القوانين التي أسماها الفيزيائيون الجاذبية الكمومية. ومع ذلك، فإن فهم الفيزيائيين لكيفية المزاجية بين النسبية العامة والميكانيكا الكمومية كان بدائيًا للغاية في الخمسينيات من القرن العشرين، لدرجة أنه على الرغم من الجهود الكبيرة، لم يحرز أحد تقدمًا كبيرًا.



وكان التقدم بطيئًا أيضًا في محاولة فهم اللبنات الأساسية للنواة الذرية، وهي النيوترون والبروتون والإلكترون وعدد كبير من الجسيمات الأولية الأخرى التي خُلقت في سرعات الجسيمات.

كان ويلر يحلم بالقفز فوق هذه الطرق المسدودة وإلقاء نظرة متزامنة على طبيعة الجاذبية الكمومية وطبيعة الجسيمات الأولية. وكان يعتقد أن مثل هذه اللمحة قد تأتي من البحث عن تلك الأماكن في الفيزياء النظرية حيث تكثر المفارقات. من حل المفارقة يأتي الفهم العميق. وكلما كانت المفارقة أعمق، زاد احتمال أن يسبر هذا الفهم حدود القرن العشرين.

وبهذه الروح، بعد وقت قصير من الخروج من جهود القنبلة الفائقة، ملأ ويلر، مع هاريسون وواكانو، الفجوات المفقودة في معرفتنا بالنجوم الباردة الميتة (الفصل الخامس)؛ وبهذه الروح فكر ويلر في «مصير الكتل الضخمة». كانت المفارقة العميقة هنا من النوع الذي كان ويلر يبحث عنه: لا يوجد نجم بارد أو ميت يمكن أن يكون أكبر من شمسين تقريبًا؛ ومع ذلك، يبدو أن السماء مليئة بنجوم حارة أضخم بكثير من ذلك، نجوم لا بد أن تبرد يومًا ما وتموت. لقد سأل أوبنهايمر، بطريقته المباشرة، قوانين الفيزياء الراسخة عما يحدث لمثل هذه النجوم، وحصل (مع سنايدر) على إجابة بدت شنيعة لويلر. وقد عزز هذا اقتناع ويلر بأنه هنا، في مصائر الكتل الضخمة، قد يلقي نظرة خاطفة على الفيزياء خارج حدود القرن العشرين. وكان ويلر على حق، كما سنرى في الفصلين الثاني عشر والثالث عشر.

كان لدى ويلر نار في بطنه، وهي حاجة عميقة ومستمرة لمعرفة مصير الكتل الكبيرة ومعرفة ما إذا كان مصيرها قد يفتح أسرار الجاذبية الكمومية والجسيمات الأولية. وعلى النقيض من ذلك، بدا أن أوبنهايمر لم يهتم كثيرًا في عام 1958. فقد صدّق حساباته الخاصة مع سنايدر، لكنه لم يُظهر أي حاجة إلى المضي قدمًا، ولم يكن لديه أي دافع نحو فهم أعمق. ربما كان قد سئم من المعارك الضارية التي شهدتها العقدان السابقان: معارك تصميم الأسلحة، ومعارك سياسية، ومعارك شخصية. ربما كان مهووسًا بأسرار المجهول. وعلى أي حال، فهو لن يساهم مرة أخرى بإجابات. نُقلت الشعلة إلى جيل جديد. سيصبح إرث أوبنهايمر هو أساس ويلر. وفي الاتحاد السوفييتي، سيصبح إرث لاندau أساس زيلدوفيش.

في مواجهته في بروكسل عام 1958 مع أوبنهايمر، أكد ويلر أنه لا يمكن الوثوق بحسابات أوبنهايمر-سنايدر. لماذا؟ بسبب المثالية الشديدة (الشكل 6.3 أعلاه). وعلى الأخص، تظاهر أوبنهايمر منذ البداية بأن النجم المتفجر ليس لديه أي ضغط على الإطلاق. من دون ضغط، كان من المستحيل على المادة المتفجرة أن تشكل موجات صدمية (تشبه أمواج المحيط المتكسرة، برغوتها وزبدها). ومن دون الضغط وموجات الصدمة، لم يكن من الممكن أن تسخن المادة المتفجرة. ومن دون الحرارة والضغط، لم تكن هناك طريقة لإثارة التفاعلات النووية ولا توجد طريقة لإصدار الإشعاع. ومن دون تدفق الإشعاع، ومن دون قذف المواد إلى الخارج عن طريق التفاعلات النووية أو الضغط أو الموجات الصدمية، لم تكن هناك طريقة لفقد النجم كتلته. مع منع فقدان الكتلة منذ البداية، لم يكن من الممكن أن يتمكن النجم الضخم من تقليل ذاته إلى أقل من شمسين ليصبح نجمًا نيوترونيًا باردًا وميتًا. لا عجب أن نجم أوبنهايمر المتفجر قد شكّل ثقبًا أسود، كما قال ويلر؛ لقد منعه مثالياته من فعل أي شيء آخر!

في عام 1939، عندما قام أوبنهايمر وسنايدر بعملهما، كان من المستحيل حساب تفاصيل الانفجار الداخلي باستخدام الضغط الواقعي (الضغط الحراري، وضغط الانتكاس، والضغط الناتج عن القوة النووية) ومع التفاعلات النووية، والموجات الصدمية، والحرارة، والإشعاع وطرد الكتلة. ومع ذلك، فإن جهود تصميم الأسلحة النووية خلال العشرين عامًا الماضية قدمت على وجه التحديد الأدوات اللازمة. يعد الضغط، والتفاعلات النووية، والموجات الصدمية، والحرارة، والإشعاع، والقذف الجماعي من السمات الأساسية للقنبلة الهيدروجينية؛ ومن دونها لن تنفجر القنبلة. لتصميم قنبلة، كان على المرء أن يدمج كل هذه الأشياء في حساباته باستخدام الحاسوب. وبطبيعة الحال، قام فريق ويلر بذلك. وبالتالي، كان من الطبيعي أن يعيد فريق ويلر الآن كتابة برامج الحاسوب الخاصة بهم، بحيث بدلاً من محاكاة انفجار قنبلة هيدروجينية، حاكوا انفجار نجم ضخم.

كان من الطبيعي أن يكون الفريق موجودًا. ومع ذلك، تفكك الفريق الآن. لقد كتبوا تقريرهم عن PMB-31 وتفرقوا للتدريس وإجراء أبحاث الفيزياء وأصبحوا إداريين في مجموعة متنوعة من الجامعات والمختبرات الحكومية.

وتركزت الخبرة الأمريكية في تصميم القنابل الآن في لوس ألamos، وفي مختبر

حكومي جديد في ليفرمور، كاليفورنيا. في ليفرمور في أواخر الخمسينيات من القرن العشرين، أصبح ستيرلينج كولجيت مفتونًا بمشكلة الانفجار النجمي. وبتشجيع من إدوارد تيلر، وبالتعاون مع ريتشارد وايت ولاحقًا مايكل ماي، شرع كولجيت في محاكاة مثل هذا الانفجار الداخلي على الحاسوب. احتفظت عمليات محاكاة كولجيت-وايت-ماي ببعض تصورات أوبنهايمر المثالية: فقد أصروا منذ البداية على أن يكون النجم المتفجر كرويًا ولا يلف (حول نفسه). ومن دون هذا القيد، كانت حساباتهم ستكون أكثر صعوبة للغاية. ومع ذلك، فإن عمليات المحاكاة التي أجروها أخذت في الاعتبار كل الأشياء التي أقلق تيلر - الضغط، والتفاعلات النووية، والموجات الصدمية، والحرارة، والإشعاع، والقذف الكتلي - وفعلوا ذلك من خلال الاعتماد بشكل كبير على خبرة تصميم القنابل وأكواد (برمجة) الحاسوب. وقد تطلب تحسين عمليات المحاكاة عدة سنوات من الجهد، ولكن بحلول أوائل الستينيات كانت تعمل بشكل جيد.

في أحد أيام الستينيات، اندفع جون ويلر إلى فصل دراسي عن النسبية في جامعة برينستون، والذي كنت ألتقاه على يديه كطالب دراسات عليا. لقد تأخر قليلاً، لكنه كان مبتهجاً ومسروراً. لقد عاد لتوّه من زيارة إلى ليفرمور، حيث اطلع على نتائج أحدث عمليات محاكاة كولجيت ووايت وماي. وبحماسة في صوته، رسم مخططاً تلو الآخر على السبورة، موضحاً ما تعلمه أصدقاؤه في ليفرمور:

عندما كانت للنجم المتفجر كتلة صغيرة، أدى إلى انفجار مستعر أعظم خارجي وشكل نجماً نيوترونياً بالطريقة التي توقعها فريتز زفيكي قبل ثلاثين عامًا. عندما كانت كتلة النجم أكبر بكثير من الحد الأقصى لنجم نيوتروني، حدث الانفجار الداخلي - على الرغم من ضغطه وتفاعلاته النووية والموجات الصدمية؛ أنتجت الحرارة والإشعاع ثقباً أسود. وكانت ولادة الثقب الأسود مشابهة بشكل ملحوظ للولادة المثالية للغاية التي حسبها أوبنهايمر وسنايدر قبل خمسة وعشرين عامًا تقريباً. كما يُرى من الخارج، تباطأ الانفجار الداخلي وتجمد عند المحيط الحرج، ولكن كما يرى شخص ما على سطح النجم، لم يتجمد الانفجار الداخلي إطلاقاً. لقد انكمش سطح النجم عبر المحيط الحرج إلى الداخل، من دون تردد.

في الواقع، كان ويلر يتوقع هذا بالفعل. لقد حوّلته رؤى أخرى (ستوصف أدناه) من ناقد لثقوب أوبنهايمر السوداء إلى مؤيد متحمس. ولكن هنا، ولأول مرة، كان هناك دليل

لملموس من محاكاة حاسوبية واقعية: الانفجار الداخلي يجب أن ينتج ثقبًا سوداء.

هل كان أوبنهايمر مسرورًا بتحول ويلر؟ لقد أظهر القليل من الاهتمام والقليل من السعادة. وفي مؤتمر دولي عُقد في ديسمبر 1963 في دالاس، تكساس، بمناسبة اكتشاف النجوم الزائفة (الفصل التاسع)، ألقى ويلر محاضرة طويلة عن الانفجار الداخلي للنجوم. في محاضراته، وصف بحماس حسابات أوبنهايمر وسنايدر لعام 1939. حضر أوبنهايمر المؤتمر، ولكن في أثناء محاضرة ويلر جلس على مقعد في الردهة وهو يتحدث مع الأصدقاء عن أشياء أخرى. وبعد مرور ثلاثين عامًا، يتذكر ويلر المشهد بالحزن في عينيه وصوته.

في أواخر الخمسينيات، بدأ زيلدوفيش يشعر بالملل من تصميم الأسلحة. لقد وُجدت الحلول لمعظم المشكلات المثيرة للاهتمام. بحثًا عن تحديات جديدة، انخرط -جزئيًا- في نظرية الجسيمات الأولية ثم في الفيزياء الفلكية، مع الحفاظ على قيادة فريق تصميم القنابل الخاص به في «الشيء» وفريق آخر يقوم بالحسابات اللازمة للقنابل الصغيرة في معهد الرياضيات التطبيقية بموسكو.

في عمله على تصميم القنبلة، كان زيلدوفيش يغمر فريقه بالأفكار، وكان أعضاء الفريق يُجرون حسابات لمعرفة ما إذا كانت الأفكار ناجحة أم لا. «شرر زيلدوفيش وفريقه هو الوقود» هكذا كانت الطريقة التي وصفها جينزبرج. ومع انتقاله إلى الفيزياء الفلكية، احتفظ زيلدوفيش بهذا الأسلوب.

أثار الانفجار النجمي -من بين المشكلات الفيزيائية الفلكية- اهتمام زيلدوفيش. وكان من الواضح بالنسبة إليه، كما هي الحال مع ويلر وكولجيت وماي ووايت في أمريكا، أن أدوات تصميم القنبلة الهيدروجينية كانت مناسبة بشكل مثالي للمحاكاة الرياضية للنجوم المتفجرة.

ولفهم تفاصيل الانفجار النجمي الداخلي الواقعي، طوَّق زيلدوفيش العديد من زملائه الشباب: دميتري ناديجين وفلاديمير إيمشينك في معهد الرياضيات التطبيقية، وميخائيل بودوريتس في التركيب. وفي سلسلة من المناقشات المكثفة، قدم لهم رؤيته لكيفية محاكاة الانفجار الداخلي على جهاز حاسوب، بما في ذلك جميع التأثيرات الرئيسية التي كانت مهمة جدًا للقنبلة الهيدروجينية: الضغط، التفاعلات النووية، الموجات الصدمية، الحرارة، الإشعاع، القذف الكتلي.

وبتحفيز من هذه المناقشات، حاكى إيمشينك وناديجين الانفجار الداخلي للنجوم ذات الكتلة الصغيرة، وتحققا -باستقلالية عن كولجيت ووايت في أمريكا- من تخمينات زفيكي حول المستعرات العظمى. بالتوازي، حاكى بودوريتس الانفجار الداخلي لنجم ضخم. وكانت النتائج التي توصل إليها بودوريتس، والتي نُشرت بالتزامن تقريباً مع نتائج ماي ووايت في أمريكا، مطابقة تقريباً للنتائج الأمريكية. لا يمكن أن يكون هناك شك. يُنتج الانفجار الداخلي ثقباً سوداء، ويحدث ذلك بالطريقة التي ادعاها أوبنهايمر وسنايدر.

إن تكيف برمجة تصميم القنبلة لمحاكاة الانفجار النجمي هو مجرد واحد من الروابط العديدة الوثيقة بين الأسلحة النووية والفيزياء الفلكية. كانت هذه الروابط واضحة لساخاروف في عام 1948. وبعد أن أُمر بالانضمام إلى فريق تصميم القنابل التابع لتام، شرع في دراسة الفيزياء الفلكية لإعداد نفسه. لقد رُغم أنفي في الوصلات بشكل غير متوقع في عام 1969.

لم أرغب قط في معرفة ما هي فكرة تيلر-أولام/ساخاروف-زيلدوفيش. القنبلة الفائقة، التي بحكم فكرتهم يمكن أن تكون «قوية بشكل لا يعقل»، لقد هوستني، ولم أرغب حتى في التكهّن بكيفية عملها. لكن سعي لفهم الأدوار المحتملة للنجوم النيوترونية في الكون دفع بفكرة تيلر-أولام إلى وعيي.

كان زيلدوفيش قد أشار قبل عدة سنوات إلى أن الغاز القادم من الفضاء بين-النجوم أو نجم قريب، الذي يسقط على نجم نيوتروني، يجب أن يسخن ويتألق بشكل ساطع: يجب أن يصبح ساخناً جداً، في الواقع، لدرجة أنه يشع في الغالب طاقة عالية؛ أي يطلق الأشعة السينية بدلاً من الضوء الأقل نشاطاً. يتحكم الغاز الساقط في معدل تدفق الأشعة السينية إلى الخارج -كما قال زيلدوفيش- وعلى العكس من ذلك، تتحكم الأشعة السينية المتدفقة في معدل سقوط الغاز. وبالتالي، يعمل الغاز والأشعة السينية معاً، ويتجان تدفقاً ثابتاً ومنظماً ذاتياً. إذا سقط الغاز بمعدل مرتفع للغاية، فسوف ينتج الكثير من الأشعة السينية، وستضرب الأشعة السينية المتدفقة الغاز الساقط، مما ينتج عنه ضغط خارجي يبطئ سقوط الغاز (الشكل 6.4 A). ومن ناحية أخرى، إذا سقط الغاز بمعدل منخفض جداً، فإنه ينتج قليلاً جداً من الأشعة السينية التي تصبح غير قادرة على إبطاء الغاز الساقط، وبالتالي يزيد معدل السقوط. هناك معدل فريد واحد فقط لسقوط الغاز، ليس عالياً جداً وليس منخفضاً جداً، f حيث تكون الأشعة السينية والغاز في حالة توازن متبادل.

أزعجتني هذه الصورة لتدفق الغاز والأشعة السينية. كنت أعلم جيدًا أنه إذا حاول شخص ما على الأرض الاحتفاظ بسائل كثيف مثل الزئبق السائل إلى أعلى عن طريق سائل أقل كثافة مثل الماء تحته، فإن ألسنة الزئبق ستأكل الماء سريعًا في طريقها نحو الأسفل، يتدفق الزئبق عبر الماء للأسفل، ويرتفع الماء للأعلى (الشكل 6.4 B وتسمى هذه الظاهرة عدم استقرار رايلي-تايلور. في صورة زيلدوفيش، كانت الأشعة السينية مثل الماء منخفض الكثافة وكان الغاز المتساقط مثل الزئبق عالي الكثافة. ألن تأكل ألسنة الغاز طريقها إلى الأشعة السينية، ألن يسقط الغاز بحرية أسفل تلك الألسنة، مما يؤدي إلى تدمير تدفق زيلدوفيش المنظم ذاتيًا (الشكل 6.4 C)؟ يمكن للحساب التفصيلي مع قوانين الفيزياء أن يخبرني ما إذا كان هذا سيحدث، ولكن مثل هذا الحساب سيكون معقدًا للغاية فيستغرق وقتًا طويلًا، لذا، بدلًا من إجراء الحسابات، سألت زيلدوفيش بعد ظهر أحد الأيام من عام 1969، عندما كنا نناقش الفيزياء في شقته في موسكو.

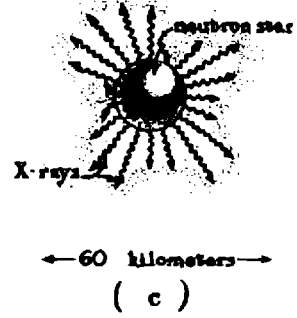
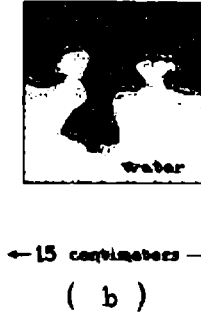
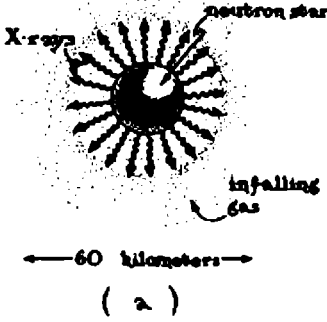
بدا زيلدوفيش غير مرتاح بعض الشيء عندما طرحت السؤال، لكن إجابته كانت حازمة: «لا، كيب، هذا لا يحدث. لا توجد ألسنة في الأشعة السينية. إن تدفق الغاز مستقر». «كيف عرفت ياكوف بوريسوفيتش؟»، كنت من سألت. ومن المثير للدهشة أنني لم أتحصل على إجابة. بدا واضحًا أن زيلدوفيش أو أي شخص آخر قد أجرى حسابًا تفصيليًا أو تجربة توضح أن الأشعة السينية يمكنها الضغط بقوة على الغاز من دون أن تدمر ألسنة الدفع لرايلي-تايلور، لكن زيلدوفيش لم يتمكن من توجيهي إلى أي حساب أو تجربة أي من الأبحاث المنشورة في هذا القبيل. ولم يصف لي الفيزياء التفصيلية التي تحدث. كما هو غير معهود منه!

وبعد بضعة أشهر كنت أنتزه في جبال سييرا العالية في كاليفورنيا مع ستيرلينج كولجيت. (يعد كولجيت واحدًا من أفضل الخبراء الأمريكيين في تدفقات السوائل والإشعاع، وقد شارك بعمق في المراحل الأخيرة من جهود القنبلة الأمريكية العملاقة، وكان أحد فيزيائي ليفرمور الثلاثة الذين حاكوا انفجار نجم على جهاز حاسوب). بينما كنا نسير، طرحت على كولجيت نفس السؤال الذي طرحته على زيلدوفيش، فأعطاني نفس الإجابة: التدفق مستقر؛ لا يستطيع الغاز الهروب من قوة الأشعة السينية عن طريق تطوير الألسنة. «كيف عرفت يا ستيرلينج؟» سألت. فأجاب: «لقد بدا ذلك واضحًا». «أين يمكنني العثور على الحسابات أو التجارب؟» سألت. فأجاب: «لا أعرف».

Infalling gas slowed
by X-rays

Rayleigh-Taylor
instability

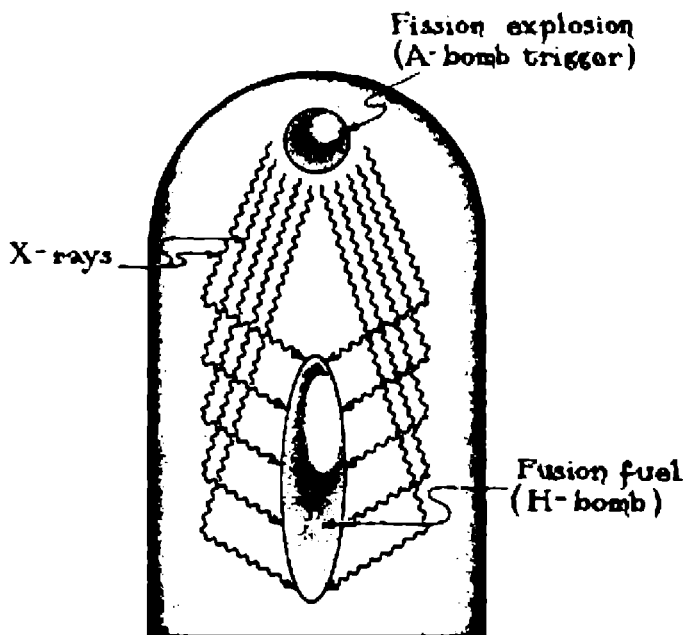
?



6.4 (a) يتباطأ سقوط الغاز على النجم النيوتروني بسبب ضغط الأشعة السينية المتدفقة. (b) الزئبق السائل الذي يحاول السقوط في مجال الجاذبية الأرضية يعوقه الماء الموجود تحته؛ كنتيجة لعدم استقرار رايلي-تايلور. (c) هل من الممكن أن يكون هناك أيضًا عدم استقرار رايلي-تايلور للغاز الساقط الذي تعوقه الأشعة السينية للنجم النيوتروني؟

قلت لستيرلينج: «هذا غريب جدًا. أخبرني زيلدوفيش نفس الشيء بالضبط: التدفق مستقر. لكنه، مثلك، لا يوجهني إلى أي دليل». «أوه! هذا رائع». قال ستيرلينج: «لقد عرف زيلدوفيش ذلك حقًا».

وبعد ذلك عرفت أيضًا. لم أكن أريد أن أعرف. لكن الاستنتاج كان لا مفر منه. يجب أن تكون فكرة تيلر-أولام هي استخدام الأشعة السينية، المنبعثة في الميكروثانية الأولى من زناد الانشطار (القنبلة الذرية)، لتسخين الوقود الاندماجي للقنبلة العملاقة والمساعدة في ضغطه وإشعاله (الشكل 6.5). وقد تأكد أن هذا بالفعل جزء من فكرة تيلر-أولام في الثمانينيات في العديد من المنشورات الأمريكية غير السرية؛ وإلا فلن أذكرها هنا.



6.5 رسم تخطيطي يوضح أحد جوانب فكرة تيلر-أولام / ساخاروف-زيلدوفيش لتصميم قنبلة هيدروجينية: ينتج انفجار انشطاري (محفز القنبلة الذرية) أشعة سينية مكثفة تركز بطريقة ما على الوقود الاندماجي. (ديوتيرييد الليثيوم، LiD). من المفترض أن تسخن الأشعة السينية وقود الاندماج النووي وتساعد على ضغطه لفترة كافية لحدوث تفاعلات الاندماج النووي. إن تقنية تركيز الأشعة السينية والمشكلات العملية الأخرى هائلة للغاية، لدرجة أنه من خلال معرفة هذه القطعة من «سر تيلر-أولام»، لا يقطع المرء سوى مسافة متناهية الصغر على الطريق نحو بناء قنبلة فائقة قابلة للاستخدام.

ما الذي حوّل ويلر من متشكك في الثقوب السوداء إلى مؤمن ومناصر لها؟ كانت المحاكاة الحاسوبية للنجوم المتفجرة مجرد التحقق النهائي من تحوله. والأهم من ذلك بكثير هو تدمير الانغلاق العقلي. لقد انتشر هذا الانغلاق العقلي في مجتمع علماء الفيزياء النظرية في العالم منذ عشرينيات القرن العشرين وحتى خمسينياته. وقد عززته جزئياً مفردة سفارتشيلد التي استُخدمت لاحقاً للثقب الأسود. وقد عززه أيضاً الاستنتاج الغامض والمتناقض على ما يبدو، من حسابات أوبنهايمر وسنايدر المثالية، وهو أن النجم المتفجر يصبح متجمداً إلى الأبد في المحيط الحرج («مفردة سفارتشيلد») من وجهة نظر مراقب خارجي ثابت، لكنه ينفجر بسرعة عبر نقطة التجمد وإلى الداخل من وجهة نظر الراصد على سطح النجم.

وفي موسكو، واجه لاندau وزملاؤه، رغم تصديقهم لحسابات أوبنهايمر وسنايدر، صعوبة بالغة في التوفيق بين وجهتي النظر هاتين. قال لي يفجينى ليفشيتز، صديق لاندau المقرب، بعد بضع سنوات: «لا يمكنك أن تقدر مدى صعوبة فهم العقل البشري لكيفية أن تكون وجهتا النظر صحيحتين في وقت واحد».

ثم في أحد أيام عام 1958، وهو نفس العام الذي كان فيه ويلر يهاجم استنتاجات أوبنهايمر وسنايدر، وصل إلى موسكو عدد من مجلة المراجعات الفيزيائية مع مقال بقلم ديفيد فنكلشتاين، الأستاذ المساعد في جامعة أمريكية معروفة على نطاق ضيق، معهد ستيفنز للتكنولوجيا (هوبوكين في نيوجيرسي). قرأ كل من لاندau وليفشيتز المقال. لقد كان الوحي. فجأة أصبح كل شيء واضحًا⁵.

زار فنكلشتاين إنجلترا في ذلك العام وألقى محاضرات في كلية كينجز في لندن. استقل روجر بنروز (الذي أحدث ثورة في فهمنا لما يحدث داخل الثقوب السوداء؛ انظر الفصل الثالث عشر) القطار إلى لندن للاستماع إلى محاضرة فنكلشتاين، وعاد إلى كامبريدج متحمسًا.

في برينستون، كان ويلر مفتونًا في البداية، لكنه لم يكن مقتنعًا تمامًا. ولم يقتنع إلا بالتدريج على مدى السنوات العديدة التالية. لقد كان أبطأ من لاندau أو بنروز - على ما أعتقد - لأنه كان ينظر بشكل أعمق. ركز على رؤيته القائلة بأن الجاذبية الكمومية يجب أن تجعل النيوكليونات (النيوترونات والبروتونات) الموجودة في النجم المتفجر تتحلل إلى إشعاع وتنجو من الانفجار الداخلي، وبدا من المستحيل التوفيق بين هذه الرؤية وبين رؤية فنكلشتاين. ومع ذلك، كما سنرى لاحقًا، كانت رؤية ويلر وبصيرة فنكلشتاين صحيحتين إلى حد ما.

إذن، ما رؤية فنكلشتاين؟ اكتشف فنكلشتاين، عن طريق الصدفة إلى حد ما وفي سطرين فقط من الرياضيات، إطارًا مرجعيًا جديدًا لوصف هندسة الزمكان لشفارتشيلد. لم يكن فنكلشتاين مدفوعًا بانتهاء النجوم، ولم يربط بين إطاره المرجعي الجديد والانتهاء النجمي. ومع ذلك، بالنسبة إلى الآخرين، كان المغزى الضمني لإطاره المرجعي الجديد واضحًا. لقد أعطاهم منظورًا جديدًا تمامًا حول الانفجار النجمي.



ديفيد فنكلشتاين، كاليفورنيا. 1958. [تصوير هربرت س. سونيفيلد؛ إهداء ديفيد فنكلشتاين].

إن هندسة الزمكان خارج النجم المتفجر هي هندسة سفارتشيلد، وبالتالي يمكن وصف الانفجار الداخلي للنجم باستخدام الإطار المرجعي الجديد لفنكلشتاين. أصبح إطار فنكلشتاين الجديد للتو مختلفًا تمامًا عن الأطر المرجعية التي التقيناها سابقًا (الفصلان الأول والثاني). وكانت معظم تلك الإطارات (المختبرات التخيلية) صغيرة الحجم، وكانت جميع أجزاء كل إطار (أعلى، أسفل، جنب، وسط) في حالة سكون بعضها بالنسبة إلى بعض. على النقيض من ذلك، كان الإطار المرجعي لفنكلشتاين كبيرًا بما يكفي ليغطي في الوقت نفسه مناطق الزمكان البعيدة عن النجم المتفجر، والمناطق القريبة منه، وجميع المناطق الواقعة بينهما. والأهم من ذلك، أن الأجزاء المختلفة من إطار فنكلشتاين تتحرك بعضها بالنسبة إلى بعض: الأجزاء البعيدة عن النجم ثابتة؛ أي

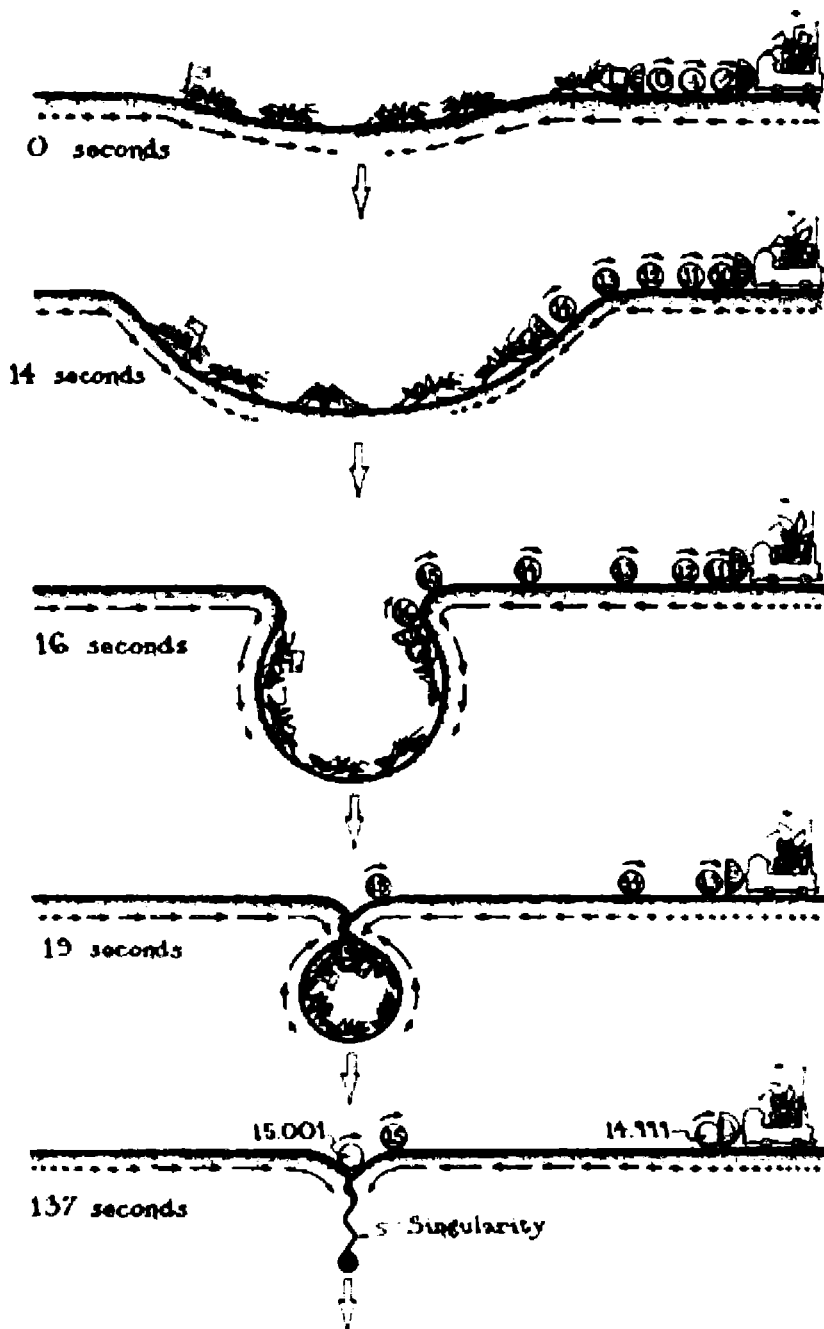
لا تنفجر، في حين أن الأجزاء القريبة من النجم تتساقط إلى الداخل مع سطح النجم المتفجر. في المقابل، يمكن استخدام إطار فنكلشتاين لوصف الانفجار الداخلي للنجم في وقت واحد من وجهة نظر المراقبين الساكنين البعيدين ومن وجهة نظر المراقبين الذين ينتقلون إلى داخل النجم المتفجر. وقد نجح الوصف الناتج في التوفيق بشكل جميل بين تجميد الانفجار الداخلي إذا رُصد من مسافة بعيدة، وبين الانفجار الداخلي المستمر إذا رُصد من سطح النجم.

في عام 1962، بنى اثنان من أعضاء مجموعة ويلر البحثية في برينستون، ديفيد بيكيدورف وتشارلز ميسنر، مجموعة من مخططات التضمين لتوضيح هذا التوفيق، وفي عام 1967 حوِّلت مخططات التضمين الخاصة بهما إلى التشبيه الخيالي التالي لمقال في مجلة ساينتيفيك أمريكان.

ذات مرة، عاش ست من النمل على غشاء مطاطي كبير (الشكل 6.6). ولأن هذا النمل ذكي للغاية، فقد تعلم التواصل باستخدام كرات الإشارة التي تندرج بسرعة ثابتة («سرعة الضوء») على طول سطح الغشاء. ولسوء الحظ، لم يحسب النمل قوة الغشاء.

وفي أحد الأيام، تجمع خمس من النمل بالقرب من مركز الغشاء، وتسبب وزنه في انهيار الغشاء. كان محاصرًا؛ لم يتمكن من الزحف بالسرعة الكافية للهروب. كانت النملة السادسة -وهي نملة متخصصة في علم الفلك- على مسافة آمنة باستخدام تلسكوب كرة الإشارة الخاص بها. حين انهار الغشاء، أرسل النمل المحاصر كرات إشارة إلى النملة الفلكية كي تنجو من مصيرها.

قام الغشاء بفعل شيئين عندما انهار: أولاً، انكمش سطحه إلى الداخل، مما أدى إلى سحب الأجسام المحيطة نحو مركز الانهيار بنفس الطريقة التي تسحب بها جاذبية النجم المتفجر الأجسام نحو مركزه. ثانيًا، ترهل الغشاء وأصبح منحنيًا على شكل وعاء مشابه للشكل المنحني للفضاء حول نجم منفجر (قارن مع الشكل 6.2).



6.6 يوفر الغشاء المطاطي المنهار الذي يسكنه النمل تماثلاً خيالياً للانفجار الداخلي للنجم بفعل الجاذبية لتكوين ثقب أسود. [مقتبس من ثورن (1967)]

انكمش سطح الغشاء بشكل أسرع وأسرع مع استمرار الانهيار. ونتيجة لذلك، استقبلت النملة الفلكية كرات الإشارة المتباعدة بشكل منتظم في الوقت المناسب عندما أرسلها النمل المحاصر، على فترات زمنية متباعدة بشكل متزايد. (وهذا مشابه لاحتراق الضوء الصادر عن نجم متفجر). أرسلت الكرة رقم 15 بعد 15 ثانية من بدء الانهيار، في اللحظة المحددة التي امتص المحيط الحرج للغشاء النمل المحاصر. بقيت الكرة 15 إلى الأبد عند المحيط الحرج لأن الغشاء الموجود هناك انكمش بنفس سرعة حركة الكرة (سرعة الضوء). قبل 0.001 ثانية فقط من الوصول إلى المحيط الحرج، أرسل النمل المحاصر الكرة رقم 14.999 (كما هو موضح في الرسم الأخير فقط). هذه الكرة، التي بالكاد تجاوزت الغشاء المنقبض، لم تصل إلى النملة الفلكية إلا بعد 137 ثانية من بدء الانهيار. الكرة رقم 15.001، التي أرسلت بعد 0.001 ثانية من المحيط الحرج، امتصت بلا رحمة في المنطقة شديدة الانحناء وسُحقت مع النملات الخمس المحاصرة.

لكن النملة الفلكية لم تستطع قط أن تتعلم شيئاً عن السحق. لن تتلقى أبداً كرة الإشارة رقم 15، أو أي كرات إشارة منبعثة بعدها؛ وذلك الذي قبل الكرة 15 سيستغرق وقتاً طويلاً للهروب بحيث سيبدو للنملة الفلكية أن الانهيار يتباطأ ويتجمد عند المحيط الحرج.

هذا التشبيه صادق بشكل ملحوظ في إعادة إنتاج سلوك النجم المتفجر:

1. شكل الغشاء هو بالضبط شكل الفضاء المنحني حول النجم، كما هو موضح في مخطط التضمين.

2. إن حركات كرات الإشارة الموجودة على الغشاء هي بالضبط نفس حركات فوتونات الضوء في الفضاء المنحني للنجم المتفجر. على وجه الخصوص، تتحرك كرات الإشارة بسرعة الضوء التي تُقاس محلياً بواسطة أي نملة ساكنة على الغشاء؛ ومع ذلك، فإن الكرات المنبعثة قبل الرقم 15 مباشرة تستغرق وقتاً طويلاً جداً للهروب، وهي فترة طويلة جداً بحيث يبدو لعالم الفلك أن الانهيار يتجمد. وبالمثل، فإن الفوتونات المنبعثة من سطح النجم تتحرك بسرعة الضوء التي يقيسها أي شخص محلياً؛ ومع ذلك، فإن الفوتونات المنبعثة قبل أن ينكمش النجم داخل محيطه الحرج (أفق) تستغرق وقتاً طويلاً جداً للهروب، ما دام الانفجار الداخلي لا بد وأن يظهر للمراقبين الخارجيين متجمداً.

3. النمل المحاصر لا يرى أي تجمد على الإطلاق عند المحيط الحرج. يمتصه المحيط الحرج من دون تردد، ثم سيُسحق. وبالمثل، فإن أي شخص على سطح نجم منفجر لن يتمكن من رؤية تجمد الانفجار الداخلي. سوف يعاين الانفجار الداخلي من دون تردد، وسيسحقه المد والجذر للجاذبية (الفصل الثالث عشر).

هذا ما ترجم إلى مخططات مضمنة الرؤية التي جاءت من الإطار المرجعي الجديد لفنكلشتاين. وبهذه الطريقة في التفكير حول الانفجار الداخلي، لم يعد هناك مزيد من الغموض. إن النجم المتفجر ينكمش بالفعل عبر المحيط الحرج من دون تردد. إن ظهوره وكأنه يتجمد كما يُرى من بعيد هو وهم.

إن المخططات المضمنة للنمل لا تلتقط سوى بعض الأفكار التي جاءت من الإطار المرجعي الجديد لفنكلشتاين، وليس كلها. ويجسد الشكل 6.7 مزيداً من الرؤية، وهو رسم تخطيطي للزمكان للنجم المتفجر داخلياً.

حتى الآن، كانت مخططات الزمكان الوحيدة التي التقينا بها هي في الزمكان المسطح في النسبية الخاصة؛ على سبيل المثال، الشكل 1.3. في الشكل 1.3، رسمنا مخططاتنا من وجهتي نظر مختلفتين: وجهة نظر الإطار المرجعي بالقصور الذاتي الساكن في مدينة باسادينا (مع تجاهل سحب الجاذبية للأسفل)، الشكل 1.3 c؛ وإطار القصور الذاتي المتصل بسيارتك الرياضية عالية السرعة في أثناء تصغيرك لباسادينا، كولورادو بوليفارد، الشكل 1.3 b. في كل رسم بياني، رسمنا المكان للإطار الذي اخترناه أفقيًا، والزمن عموديًا.

في الشكل 6.7، الإطار المرجعي المختار هو إطار فنكلشتاين. وبناءً على ذلك، فإننا نرسم أفقيًا اثنين من أبعاد المكان الثلاثة، كما قيست في إطار فنكلشتاين («المكان عند فنكلشتاين»)، ونرسم الزمن عموديًا كما قيس في إطاره («زمن فنكلشتاين»). وبما أن إطار فنكلشتاين، بعيداً عن النجم، ثابت (لا ينفجر)، فإن الزمن الذي قضاه فنكلشتاين هناك هو الزمن الذي يعيشه مراقب ثابت. وبما أن إطار فنكلشتاين، بالقرب من النجم، يسقط إلى الداخل مع انهيار السطح النجمي، فإن الزمن الذي يقضيه فنكلشتاين هناك هو الزمن الذي يعيشه الراصد الساقط.

تظهر شريحتان أفقيتان في الرسم التخطيطي. تصور كل منهما اثنين من أبعاد المكان في لحظة محددة من الزمن، ولكن مع إزالة انحناء المكان بحيث يبدو المكان مسطحاً.

وبشكل أكثر تحديدًا، تمثل أطوال المحيطات حول مركز النجم بدقة على هذه الشرائح الأفقية، ولكن نصف القطر (المسافات إلى المركز) ليس كذلك. لتمثيل نصف القطر وأطوال المحيطات بشكل صحيح، يجب علينا استخدام مخطط التضمين كذلك الموجود في الشكل 6.2 أو الموجود في مثل النمل، الشكل 6.6. سيظهر انحناء المكان بوضوح: ستكون أطوال المحيطات أقل من 2π مضروبًا في نصف القطر. من خلال رسم الشرائح الأفقية بشكل مسطح، فإننا نزيل انحناءاتها بشكل مصطنع. هذا التسطيع غير الصحيح للمكان هو الثمن الذي ندفعه لجعل المخطط مقروءًا. والمكافأة التي نكتسبها هي قدرتنا على رؤية المكان والزمن معًا في مخطط واحد واضح.

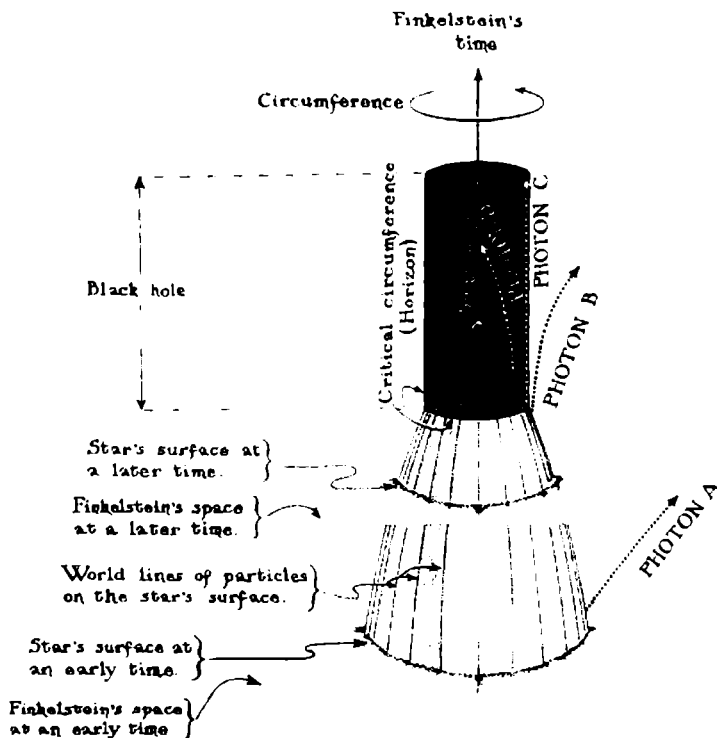
في الزمن المبكر الموضح في الرسم البياني (الشريحة الأفقية السفلية)، كان النجم -مع غياب بُعد مكاني واحد- هو الجزء الداخلي لدائرة كبيرة؛ إذا استُعيد البعد المفقود، فسيكون النجم هو الجزء الداخلي من كرة كبيرة. وفي وقت لاحق (الشريحة الثانية)، انكمش النجم؛ إنه الآن داخل دائرة أصغر. وفي وقت لاحق، يمر النجم عبر محيطه الحرج، وبعد ذلك ينكمش إلى محيط صفر، مما يخلق هناك مفردة، والتي فيها وفقًا للنسبية العامة، يُسحق النجم ويفنى من الوجود.

لن نناقش تفاصيل هذه المفردة حتى الفصل الثالث عشر، ولكن من المهم أن نعرف أنها شيء مختلف تمامًا عن «مفردة سفارتشيلد» التي تحدث عنها الفيزيائيون منذ عشرينيات القرن الماضي وحتى خمسينياته. كانت «مفردة سفارتشيلد» هي الاسم الخاطئ الذي أطلقوه على المحيط الحرج أو الثقب الأسود؛ في حين أن هذه «المفردة» هي الجسم الموجود في مركز الثقب الأسود.

الثقب الأسود نفسه هو منطقة الزمكان التي تظهر باللون الأسود في المخطط؛ أي المنطقة داخل المحيط الحرج في مستقبل سطح النجم المتفجر. ويكون سطح الثقب (أفق) عند المحيط الحرج.

تظهر أيضًا في الرسم البياني الخطوط العالمية (المسارات عبر الزمكان) لبعض الجسيمات المرتبطة بسطح النجم. عندما تتحرك عين المرء لأعلى في المخطط (أي مع مرور الزمن)، يرى المرء أن خطوط العالم هذه تتحرك أقرب فأقرب إلى مركز النجم (إلى المحور المركزي للمخطط). تُظهر هذه الحركة انكماش النجم مع مرور الزمن.

الأهم هو الخطوط العالمية المكونة من أربعة فوتونات (أربعة جسيمات من الضوء). هذه الفوتونات هي نظائر كرات الإشارة في مثال النمل. ينبعث الفوتون A إلى الخارج من سطح النجم في اللحظة التي يبدأ فيها النجم في الانفجار (الشريحة السفلية). وينتقل إلى الخارج بسهولة، إلى محيطات أكبر فأكبر، مع مرور الزمن (كما تتحرك العين لأعلى في الرسم التخطيطي). الفوتون B، المنبعث قبل زمن قصير من وصول النجم إلى محيطه الحرج، يتطلب زمنًا طويلًا للهروب؛ إنه نظير كرة الإشارة رقم 14.999 في مثال النمل. الفوتون C، ينبعث بدقة عند المحيط الحرج. يبقى دائمًا هناك، تمامًا مثل كرة الإشارة رقم 15، والفوتون D، المنبعث من داخل المحيط الحرج (داخل الثقب الأسود)، لا يهرب أبدًا؛ تسحبه الجاذبية الشديدة للثقب إلى المفردة، تمامًا مثل كرة الإشارة 15.001.



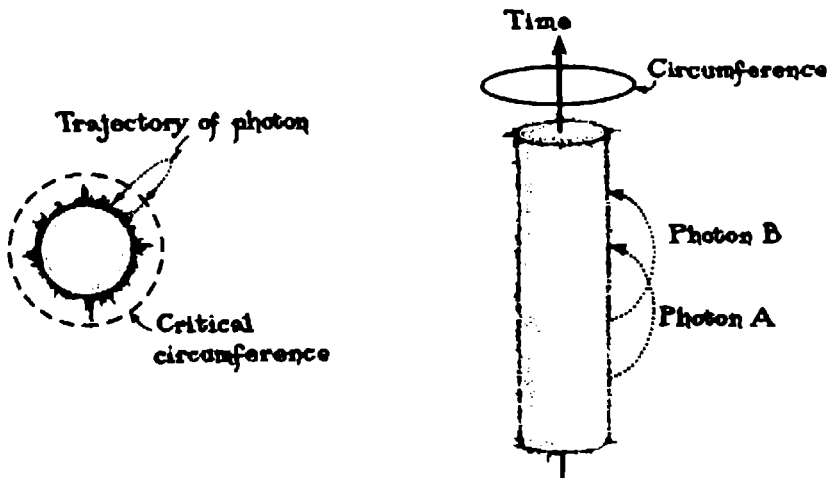
6.7 مخطط للزمان بصور انفجار نجم لتكوين ثقب أسود. رُسم الزمن لأعلى كما قيس في الإطار المرجعي لفنكلشتاين. رسم اثنان من الأبعاد الثلاثة للمكان هذا الإطار أفقيًا. الشرائح الأفقية هي «لقطات» ثنائية الأبعاد للنجم المتفجر والثقب الأسود الذي يخلقه في لحظات محددة من زمن فنكلشتاين، ولكن مع قمع انحناء الفضاء.

من المثير للاهتمام مقارنة هذا الفهم الحديث لانتشار الضوء من نجم منفجر مع تنبؤات القرن الثامن عشر للضوء المنبعث من نجم أصغر من محيطه الحرج.

بالعودة إلى (الفصل الثالث) أنه في أواخر القرن الثامن عشر استخدم جون ميشيل في إنجلترا وبيير سيمون لابلاس في فرنسا قوانين نيوتن للجاذبية، ووصف نيوتن للضوء على هيئة كريات للتنبؤ بوجود الثقوب السوداء. كانت هذه «الثقوب السوداء تبعاً لفيزياء نيوتن» في الحقيقة نجومًا ثابتة ذات محيط صغير جدًا (أقل من المحيط الحرج) لدرجة أن الجاذبية منعت الضوء من الهروب من المناطق المجاورة للنجوم.

النصف الأيسر من الشكل 6.8 (مخطط مكاني، وليس مخططاً زمكانيًا) يصور نجمًا كهذا داخل محيطه الحرج، ويصور المسار المكاني للفوتون (كرة ضوئية) منبعثًا من سطح النجم رأسياً تقريباً (عمودياً). الفوتون المتطاير، مثل صخرة ملقاة، يتباطأ بسبب جاذبية النجم، ويتوقف، ثم يسقط مرة أخرى داخل النجم.

يصور النصف الأيمن من الشكل في مخطط الزمكان حركات اثنين من هذه الفوتونات. يُمثل الرسم لأعلى زمن نيوتن الكوني؛ مرسوم للخارج، مساحته مطلقة. ومع مرور الزمن، يكتسح النجم الدائري الأسطوانة العمودية؛ في أي لحظة من الزمن (شريحة أفقية من خلال الرسم البياني) يوصف النجم بنفس الدائرة كما في الصورة اليسرى. مع مرور الزمن، يطير الفوتون A ثم يسقط مرة أخرى داخل النجم، والفوتون B، المنبعث بعد قليل، يفعل الشيء نفسه.



6.8 التنبؤات من قوانين نيوتن الفيزيائية لحركة الكريات الضوئية (الفوتونات) المنبعثة من نجم يقع داخل محيطه الحرج. على اليسار: مخطط مكاني (على غرار الشكل 3.1). على اليمين: مخطط الزمكان.

من المفيد مقارنة هذه النسخة؛ فيزياء نيوتن (غير الصحيحة) للنجم داخل محيطه الحرج والفوتونات التي يبعثها مع النسخة النسبية (الصحيحة)، كما في الشكل 6.7. تُظهر المقارنة اختلافين عميقين بين تنبؤات قوانين نيوتن وتنبؤات أينشتاين:

1. تسمح قوانين نيوتن (الشكل 6.8) لنجم أصغر من المحيط الحرج بأن يعيش حياة سعيدة وغير متفجرة، مع موازنة ضغط جاذبيته إلى الأبد من خلال ضغطه الداخلي. تصر قوانين أينشتاين (الشكل 6.7) على أنه عندما يكون أي نجم أصغر من محيطه الحرج، فإن ضغط جاذبيته سيكون قويًا جدًا بحيث لا يمكن لأي ضغط داخلي أن يوازنه. ليس لدى النجم خيار سوى أن ينفجر.

2. تتنبأ قوانين نيوتن (الشكل 6.8) بأن الفوتونات المنبعثة من سطح النجم في البداية سوف تطير إلى محيط أكبر، وحتى في بعض الحالات إلى محيط أكبر من المحيط الحرج، وبعد ذلك ستسحب مرة أخرى. تتطلب قوانين أينشتاين (الشكل 6.7) أن أي فوتون ينبعث من داخل المحيط الحرج يتحرك دائمًا نحو محيطات أصغر فأصغر. السبب الوحيد الذي يجعل مثل هذا الفوتون قادرًا على الهروب من سطح النجم هو أن النجم نفسه ينكمش بشكل أسرع من تحرك الفوتون الموجه نحو الخارج نحو الداخل (الشكل 6.7).

على الرغم من أن رؤية فنكلشتاين ومحاكاة برنامج القنبلة أفنعتنا ويلر تمامًا بأن انفجار نجم ضخم لا بد أن ينتج ثقبًا أسود، فإن مصير المادة النجمية المتفجرة ظل يزعجه في الستينيات، تمامًا كما أزعجته مواجهة أوبنهايمر في بروكسل عام 1958. أصرت النسبية العامة على أن مادة النجم ستختفي من الوجود في المفردة الموجودة في مركز الثقب (الفصل الثالث عشر)، لكن مثل هذا التنبؤ بدا غير مقبول فيزيائيًا. بالنسبة إلى ويلر، بدا واضحًا أن قوانين النسبية العامة يجب أن تفشل في مركز الثقب وأن تستبدل بها قوانين جديدة للجاذبية الكمومية، وهذه القوانين الجديدة يجب أن توقف الانهيار. ربما توقع ويلر، بناء على وجهات النظر التي شرحها في بروكسل، أن القوانين الجديدة من شأنها تحويل المادة المتفجرة إلى إشعاع تسمح الميكانيكا الكمومية بشق طريقه للخروج من الثقب ثم يهرب إلى الفضاء بين-النجوم. يتطلب اختبار هذه التخمينات فهمًا متعمقًا للزواج بين الميكانيكا الكمومية والنسبية العامة. وهنا يكمن جمال المضاربة. لقد كان بمثابة اختبار للمساعدة في اكتشاف القوانين الجديدة للجاذبية الكمومية.

عندما كنت أحد طلاب ويلر في أوائل الستينيات، اعتقدت أن افتراضه حول تحول المادة إلى إشعاع عند نقطة المفردة ومن ثم حفر طريقها للخروج من الثقب كان أمرًا مثيرًا للغضب. كيف يمكن أن يصدق ويلر مثل هذا الشيء؟ من المؤكد أن القوانين الجديدة للجاذبية الكمومية ستكون مهمة في المفردة الموجودة في مركز الثقب، كما أكد ويلر. ولكن ليس بالقرب من المحيط الحرج. وكان المحيط الحرج يقع في «المجال الكبير»، حيث يجب أن تكون النسبية العامة دقيقة للغاية؛ وكانت قوانين النسبية العامة واضحة تمامًا، فلا شيء يمكن أن يفلت من المحيط الحرج. الجاذبية تمسك بكل شيء. وبالتالي، لا يمكن أن يكون هناك «نفق تصنعه الميكانيكا الكمومية» (مهما كان) للسماح للإشعاع بالخروج؛ لقد كنت مقتنعًا بذلك بشدة.

في عامي 1964 و1965، كتبنا أنا وويلر كتابًا تقنيًا، بالتعاون مع كينت هاريسون وماسامي واكانو، حول النجوم الباردة والميتة والانهيار النجمي. لقد صُدمت عندما أصر ويلر على تضمين الفصل الأخير تكهناته بأن الإشعاع قد يشق طريقه خارج الثقب ويهرب إلى الفضاء بين-النجوم. وفي صراع اللحظة الأخيرة لإقناع ويلر بحذف تكهناته من الكتاب، طلبت المساعدة من ديفيد شارب، أحد باحثي ما بعد الدكتوراه لدى ويلر. تجادلنا أنا وديفيد بقوة مع ويلر في مكالمة هاتفية ثلاثية، واستسلم ويلر أخيرًا.

كان ويلر محققاً. كنت أنا وديفيد مخطئين. بعد مرور عشر سنوات، استخدم زيلدوفيش وستيفن هوكينج زوجاً جزئياً طُور حديثاً بين النسبية العامة والميكانيكا الكمومية لإثبات، رياضياً، أن الإشعاع يمكنه أن يشق طريقه خارج الثقب الأسود - وإن كان ببطء شديد جداً (الفصل الثاني عشر). بعبارة أخرى، يمكن للثقوب السوداء أن تتبخر، على الرغم من أنها تفعل ذلك ببطء شديد، لدرجة أن الثقب الذي يتكون نتيجة انفجار نجم سيتطلب زمناً أطول بكثير من عمر الكون ليختفي.

الأسماء التي نطلقها على الأشياء مهمة. وكلاء نجوم السينما، الذين يغيرون أسماء عملائهم من نورما جان بيكر إلى مارلين مونرو، ومن بيلا بلاسكو إلى بيلا لوجوسي، يعرفون ذلك جيداً. وكذلك يفعل الفيزيائيون. في صناعة السينما، يساعد الاسم في ضبط النغمة، والإطار العقلي الذي ينظر به المشاهد إلى النجمة - بريق مارلين مونرو، ورعب بيلا لوجوسي. في الفيزياء، يساعد الاسم في تحديد الإطار العقلي الذي ننظر من خلاله إلى المفهوم الفيزيائي. الاسم الجيد سوف يستحضر صورة ذهنية تؤكد أهم خصائص المفهوم، وبالتالي سيساعد في تحفيز البحث الجيد بطريقة لا واعية وبديهية. يمكن للاسم السيئ أن ينتج حواجز ذهنية تعوق البحث.

ربما لم يكن هناك ما هو أكثر تأثيراً في منع الفيزيائيين - بين عامي 1939 و-1958 من فهم الانفجار الداخلي للنجم من الاسم الذي استخدموه للمحيط الحرج: «مفردة شفارتسشيلد». تستحضر كلمة «المفردة» صورة لمنطقة تصبح فيها الجاذبية قوية بلا حدود، مما يتسبب في انهيار قوانين الفيزياء كما نعرفها - وهي الصورة التي نفهم الآن أنها صحيحة بالنسبة إلى الجسم الموجود في مركز الثقب الأسود، ولكن ليس للمحيط الحرج. جعلت هذه الصورة من الصعب على الفيزيائيين قبول استنتاج أوبنهايمر - سنايدر بأن الشخص الذي يمر عبر مفردة شفارتسشيلد (المحيط الحرج) على نجم منفجر لن يشعر بالجاذبية اللا نهائية ولن يرى أي انهيار للقانون الفيزيائي.

إن نفي التفرد عن مفردة شفارتسشيلد (المحيط الحرج) لم يصبح واضحاً تماماً حتى اكتشف ديفيد فنكلشتاين إطاره المرجعي الجديد واستخدمه لإظهار أن مفردة شفارتسشيلد ليست سوى موقع يمكن أن تسقط فيه الأشياء ولكن لا يمكن أن يخرج منه شيء - وبالتالي، موقع لا يمكننا رؤيته أبداً من الخارج. يستمر النجم المتفجر في الوجود بعد أن يفرق في مفردة شفارتسشيلد، كما أظهر الإطار المرجعي لفنكلشتاين،

تمامًا كما تستمر الشمس في الوجود بعد أن تفرق تحت أفق الأرض. ولكن كما أننا، نحن الجالسين على الأرض، لا نستطيع رؤية الشمس خارج أفقنا، كذلك الراصدون البعيدون عن النجم المتفجر لا يمكنهم رؤية النجم بعد أن ينفجر من خلال مفردة شفارتشيلد. حفز هذا التشبيه فولفجانج ريندلر، عالم الفيزياء بجامعة كورنيل في الخمسينيات من القرن الماضي، على إعطاء مفردة شفارتشيلد (المحيط الحرج) اسمًا جديدًا، وهو الاسم الذي ظل عالمًا منذ ذلك الحين: لقد أطلق عليه اسم الأفق.

بقيت مسألة تسمية الجسم الناتج عن الانفجار النجمي. ومن عام 1958 إلى عام 1968، استخدمت أسماء مختلفة في الشرق والغرب: استخدم الفيزيائيون السوفييت اسمًا يؤكد رؤية عالم فلكي بعيد للانفجار الداخلي. تذكر أنه بسبب الصعوبة الهائلة التي واجهها الضوء في الإفلات من قبضة الجاذبية، كما يبدو من بعيد، يبدو أن الانفجار الداخلي سيستمر إلى الأبد؛ يبدو أن سطح النجم لن يصل أبدًا إلى المحيط الحرج، ولن يتشكل الأفق أبدًا. يبدو الأمر بالنسبة إلى علماء الفلك (أو لو كانت تلسكوباتهم قوية بما يكفي لرؤية النجم المتفجر) كما لو أن النجم أصبح متجمدًا خارج المحيط الحرج مباشرة. لهذا السبب، أطلق الفيزيائيون السوفييت على الجسم الناتج عن الانفجار الداخلي اسم النجم المتجمد، وقد ساعد هذا الاسم في تحديد النجمة والإطار الذهني لأبحاثهم عن الانفجار الداخلي في الستينيات.

على النقيض من ذلك، كان التركيز في الغرب على وجهة نظر الشخص الذي يركب إلى الداخل من سطح النجم المنهار، عبر الأفق إلى المفردة الحقيقية؛ وبناءً على ذلك، فإن الجرم السماوي الذي نشأ بهذه الطريقة سُمي النجم المنهار. ساعد هذا الاسم في تركيز أذهان الفيزيائيين على القضية التي أصبحت مصدر قلق كبير لجون ويلر: طبيعة المفردة التي ستزوج فيها الفيزياء الكمومية بانحناء الزمكان.

لم يكن أي من الاسمين مُرضيًا. ولم يولِ أي منهما اهتمامًا خاصًا للأفق الذي يحيط بالنجم المنهار والمسؤول عن الوهم البصري لـ «تجميد» النجوم. خلال الستينيات، كشفت حسابات الفيزيائيين تدريجيًا عن الأهمية الهائلة للأفق، وتدرجيًا أصبح جون ويلر -الشخص الذي يقلق أكثر من أي شخص آخر بشأن استخدام الأسماء المثالية- غير راضٍ أكثر فأكثر.

من عادة ويلر التأمل في الأسماء التي نطلقها على الأشياء عند الاسترخاء في حوض الاستحمام أو الاستلقاء على السرير ليلاً. في بعض الأحيان سيبحث لعدة أشهر بهذه الطريقة عن الاسم الصحيح لشيء ما. كان هذا هو بحثه عن بديل لـ«النجم المتجمد»/«النجم المنهار». وأخيراً، في أواخر عام 1967، وجد الاسم المثالي.

وبأسلوب ويلر النموذجي، لم يذهب إلى زملائه ويقول: لقد حصلت على اسم جديد رائع لهذه الأشياء؛ دعونا نسميها كاني ومانني. بدلاً من ذلك، بدأ ببساطة في استخدام الاسم كما لو لم يكن هناك اسم آخر على الإطلاق، كما لو أن الجميع قد اتفقوا بالفعل على أن هذا هو الاسم الصحيح. لقد جربه في مؤتمر حول النجوم النابضة في مدينة نيويورك في أواخر خريف عام 1967، ثم اعتمده بقوة في محاضرة ألقاها في ديسمبر 1967 أمام الجمعية الأمريكية لتقدم العلوم، بعنوان «كوننا، المعلوم والمجهول». من لم يحضر منا واجهوا الاسم أولاً في النسخة المكتوبة من محاضرته: «بسبب سقوطه الأسرع والأسرع [سطح النجم المتفجر] يتحرك بعيداً عن المراقب [البعيد] بسرعة أكبر وأكثر. ينزاح الضوء إلى اللون الأحمر. يصبح باهتاً كل ملي ثانية تلو الأخرى، وفي أقل من ثانية يصبح مظلماً جداً بحيث لا يمكن رؤيته... يتلاشى [النجم] مثل قطة تشيشير، عن الأنظار. أحدهم لا يترك وراءه سوى ابتسامته، والآخر لا يترك سوى جاذبيته. الجاذبية، نعم، لكن ضوء، لا. لا تظهر أي جسيمات أكثر من الضوء. بالإضافة إلى ذلك، فإن الضوء والجسيمات التي تسقط من الخارج... [و] تنزل إلى أسفل الثقب الأسود تزيد من كتلته وتزيد من جاذبيته».

كان الثقب الأسود هو الاسم الجديد الذي أطلقه ويلر. وفي غضون أشهر، تبناه علماء الفيزياء النسبية بحماس، وعلماء الفيزياء الفلكية، وعامة الناس، في الشرق والغرب على حد سواء -مع استثناء واحد: في فرنسا، حيث تحتوي عبارة trou noir (الثقب الأسود) على دلالات إباحية، كانت هناك مقاومة لعدة سنوات.

1. يقع بالقرب من مدينة أريزماس بين تشيلياينسك وجبال الأورال.
2. بعد اختيارهم الناجح لقنبلة مبنية على التصميم الأمريكي، عاد السوفييت إلى تصميمهم الخاص، وبنوا قنبلة تعتمد على هذا التصميم، واختبروها بنجاح في عام 1951.
3. تكهن ساخاروف بأن هذا التصميم مستوحى مباشرة من المعلومات التي تحصلوا عليها من الأمريكيين من خلال التجسس، ربما عن طريق الجاسوس كلاوس فوكس. وعلى النقيض من ذلك، أكد زيلدوفيش أنه لم يقدم فوكس ولا أي جاسوس آخر أي معلومات مهمة حول القنبلة العملاقة لم يكن فريق التصميم الخاص به يعرفها بالفعل؛

- كانت القيمة الأساسية للتجسس السوفييتي على القنبلة المملقة هي إقناع السلطات السياسية السوفيتية بأن الفيزيائيين السوفيت يعرفون ما كانوا يفعلون.
4. للعلم فقط، أنا أختلف بشدة مع ويلر (على الرغم من أنه أحد أصدقائي المقربين ومعلمي) ومع ساخاروف. للحصول على رؤى مدروسة ومطلعة حول الجدل الدائر بين تيلر وأوبنهايمر وإيجابيات وسلبيات الجدل الأمريكي حول بناء القنبلة الفاتكة، أوصي بقراءة كتاب بيث (1982) ويورك (1976). للاطلاع على وجهة نظر ساخاروف، انظر ساخاروف (1990)؛ للاطلاع على نقد لوجهة نظر ساخاروف، انظر بيث (1990). للحصول على نسخة من جلسات الاستماع لأوبنهايمر، انظر (USAEC) 1954.
5. لقد عثر بالفعل على رؤية فنكلشتاين في وقت سابق، في سياقات أخرى، فيزيائيون آخرون بما في ذلك آرثر إدينجتون، لكنهم لم يفهموا أهميتها وسرعان ما سقطت في طي النسيان.

الفصل السابع: العصر الذهبي

في هذا الفصل، وُجد الثقب الأسود يدور حول نفسه وينبض يخزن الطاقة وينفثها وليس له شعر

العام 1975؛

المكان: جامعة شيكاغو في الجانب الجنوبي من المدينة، بالقرب من شاطئ بحيرة ميشيغان.

هناك، في مكتب زاوية يطل على شارع 56، كان سابرامانين تشاندراسخار منغمسًا في تطوير وصف رياضي كامل للثقوب السوداء. كانت الثقوب السوداء التي يحللها وحوشًا مختلفة جذريًا عن تلك التي كانت موجودة في أوائل الستينيات، لما بدأ الفيزيائيون في اعتناق مفهوم الثقب الأسود. كان العقد الفاصل بين الزمين بمثابة العصر الذهبي لأبحاث الثقوب السوداء، وهو العصر الذي أحدث ثورة في فهمنا لتنبؤات النسبية العامة.

في عام 1964، في بداية العصر الذهبي، كان يُعتقد أن الثقوب السوداء هي بالضبط ما يوحي به اسمها: ثقوب في الفضاء، يمكن أن تسقط الأشياء داخلها، ولا يمكن لأي شيء أن يخرج منها. لكن خلال العصر الذهبي، غيرت هذه الصورة الحسابات تلو الأخرى، التي أجراها أكثر من مائة عالم فيزياء باستخدام معادلات النسبية العامة لأينشتاين. الآن، بينما تشاندراسخار جالس في مكتبه في شيكاغو، يجري حساباته، لم تكن الثقوب السوداء مجرد ثقوب ساكنة في الفضاء، بل أجسامًا ديناميكية: يجب أن يكون الثقب الأسود قادرًا على اللف حول محوره، وفي أثناء اللف يجب أن يخلق إعصارًا يشبه حركة الدوامة في الزمكان المنحني حول نفسه. يجب أن تخزن في تلك الدوامة طاقات هائلة، طاقات يمكن للطبيعة أن تستغلها وتستخدمها لتمد الانفجارات الكونية بالطاقة. عندما تسقط النجوم أو الكواكب أو الثقوب الصغيرة في ثقب كبير، يجب أن تجعل الثقب الكبير ينبض. يجب أن ينبض أفق الثقب الكبير للداخل والخارج، تمامًا كما ينبض سطح الأرض لأعلى ولأسفل بعد وقوع زلزال، ويجب أن تنتج هذه النبضات موجات جاذبية -تموجات في انحناء الزمكان تنتشر عبر الكون، ما يمكن وصفها بالسيمفوني التي يعزفها الثقب.

ربما كانت المفاجأة الكبرى التي خرجت من العصر الذهبي هي إصرار النسبية العامة على أن جميع خصائص الثقب الأسود يمكن التنبؤ بها بدقة من خلال ثلاثة أرقام فقط: كتلة الثقب، ومعدل لفه حول محوره، وشحنته الكهربائية. من هذه الأرقام الثلاثة، إذا كان الشخص ذكيًا بما فيه الكفاية في الرياضيات، يجب أن يكون قادرًا على حساب -على سبيل المثال- شكل أفق الثقب، وقوة جاذبيته، وتفاصيل دوامة الزمكان حوله، وترددات نبضه. العديد من هذه الخصائص كانت معروفة بحلول عام 1975، ولكن ليس كلها. مثل حساب جميع خصائص الثقب الأسود المتبقية وتعلمها تحديدًا صعبًا، وهو بالضبط نوع التحدي الذي أحبه تشاندراسخار. لقد تناول الأمر في عام 1975 باعتباره مسعاه الشخصي.

على مدار ما يقرب من أربعين عامًا، كانت آلام معاركه مع إدينجتون في الثلاثينيات مشتعلة داخل تشاندراسخار، مما أعاقه عن العودة إلى البحث عن مصير الثقوب السوداء للنجوم الضخمة. وفي تلك السنوات الأربعين كان قد وضع العديد من أسس الفيزياء الفلكية الحديثة، أسس نظريات النجوم ونبضاتها، والمجرات، والسحب الغازية بين-النجوم، وغير ذلك كثير. ولكن طوال ذلك الوقت، جذبه انبهاره بمصائر النجوم الضخمة. وأخيرًا، في العصر الذهبي، تغلب على آلامه وعاد.

عاد إلى عائلة من الباحثين كانوا جميعًا تقريبًا من الطلاب وطلاب ما بعد الدكتوراه. كان الشباب يهيمنون على العصر الذهبي، ورحب الجميع بشاندراسخار، ذي القلب الشاب ولكن في منتصف العمر، وذي السلوك المحافظ بينهم. في زيارته الطويلة إلى معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا وكامبريدج، كان يمكن رؤيته في كثير من الأحيان في الكافيتريات، محاطًا بطلاب الدراسات العليا المزينين بألوان زاهية وغير رسمية، لكنه كان يرتدي بدلة رمادية داكنة محافظة -«رمادي تشاندراسخار» كما أطلق أصدقاؤه الشباب على لون بدلته.

كان العصر الذهبي قصيرًا. منح بيل بريس -طالب الدراسات العليا في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا- للعصر الذهبي هذا الاسم، وفي صيف عام 1975، بينما تشاندراسخار يشرع في سعيه لحساب خصائص الثقوب السوداء، نظم بريس جنازة العصر الذهبي: مؤتمر لمدة أربعة أيام في جامعة برينستون، دعا فيه فقط الباحثين الذين تقل أعمارهم عن ثلاثين عامًا¹. وفي المؤتمر، اتفق بريس والعديد من زملائه الشباب على أن الوقت قد حان للانتقال إلى موضوعات بحثية أخرى. أصبحت الخطوط العريضة للثقوب السوداء كأجسام دوارة ونابضة وديناميكية موجودة الآن، وبدأت الوتيرة السريعة للاكتشافات النظرية في التباطؤ. ويبدو أن كل ما تبقى هو ملء التفاصيل. وكان بوسع تشاندراسخار وعدد قليل من الآخرين

أن يفعلوا ذلك بسهولة، في حين كان أصدقاءه الصغار (ولكنهم أصبحوا الآن كبار السن) يبحثون عن تحديثات جديدة في أماكن أخرى. لم يكن تشاندراسخار مسرورًا.



الأعلى: سابرامانين تشاندراسخار في كافتيريا طلاب معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا («الذهني») مع طلاب الدراسات العليا: شاول تيوكولسكي (يسار) وألان لايمان (يمين)، في خريف عام 1971.



بويوم: المشاركون في المؤتمر/ جنازة العصر الذهبي للثقب الأسود، بحث، جامعة برينستون، صيف 1975. الصف الأمامي، من اليسار إلى اليمين: جاكوبس بترسون، فيليب ياسكين، بيل بريس، لاري سمار، بيفرلي بيرجر، جورجيا ويت، بوب والد. الصف الثاني والثالث، من اليسار إلى اليمين: فيليب ماركوس، بتر ديث، بول شيشتر، شاول تيوكولسكي، جيم نيستر، بول ويتا، مايكل شول، برنارد كار، كليفورد ويل، توم تشيستر، بيل أونروه، ستيف كريستنسن. [أعلى: إهداء ساندور جيه كوفاكس؛ الأسفل: إهداء شاول تيوكولسكي].

المرشدون : ويلر، زيلدوفيش، سياما

من هؤلاء الشباب الذين أحدثوا ثورة في فهمنا للثقوب السوداء؟

كان معظمهم من الطلاب، وطلاب ما بعد الدكتوراه، و«أحفاد» مثقفين لثلاثة معلمين بارزين: جون أرتشبالد ويلر في برينستون، نيو جيرسي، الولايات المتحدة الأمريكية؛ وياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيش في موسكو، روسيا، جمهورية روسيا الاتحادية الاشتراكية السوفيتية؛ ودينيس سياما في كامبريدج، إنجلترا، المملكة المتحدة. ومن خلال ذريتهم الفكرية، وضع ويلر وزيلدوفيش وسياما بصماتهم الشخصية على فهمنا الحديث للثقوب السوداء.

وكان لكل من هؤلاء المرشدين أسلوبه الخاص. في الواقع، من الصعب العثور على أنماط أكثر اختلافًا. كان ويلر صاحب رؤية جذابة وملهمة. كان زيلدوفيش اللاعب/المدرّب المجتهد لفريق متماسك. كان سياما محفّرًا للتضحية بالنفس. وستعرف على كل واحد منهم على حدة في الصفحات التالية.

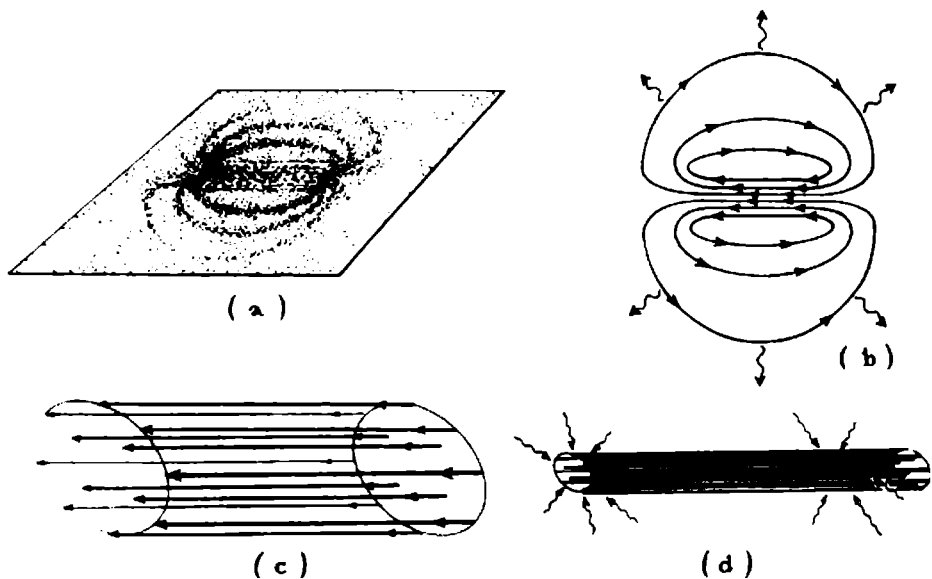
أتذكر جيدًا لقائي الأول مع ويلر. كان ذلك في سبتمبر 1962؛ أي قبل عامين من ظهور العصر الذهبي. كان ويلر قد تحول مؤخرًا إلى مفهوم الثقب الأسود، وكنت في الثانية والعشرين من عمري، وكنت قد تخرجت للتو في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا وأتيت إلى برينستون لمتابعة الدراسات العليا للحصول على درجة الدكتوراه. كان حلمي هو العمل على أبحاث النسبية تحت إشراف ويلر، لذلك طرقت باب مكتبه في المرة الأولى بخوف.

استقبلني البروفيسور ويلر بابتسامة دافئة، وأدخلني مكتبه، وبدأ على الفور (كما لو كنت زميلًا له تقدير كبير عنده، ولست طالبًا مبتدئًا تمامًا) في مناقشة أسرار الانفجار الداخلي للنجوم. عبّر عن مزاج ومحتوى تلك المناقشة الخاصة المثيرة في كتابات ويلر في تلك الحقبة: «كانت هناك مناسبات قليلة في تاريخ الفيزياء يمكن فيها للمرء أن يتوقع بشكل أكثر يقينًا مما يفعل الآن [في دراسة الانفجار الداخلي للنجوم] أنه يواجه ظاهرة جديدة، ذات طبيعة غامضة خاصة، تنتظر أن تحل... مهما كانت نتيجة [الدراسات المستقبلية]، يشعر المرء أنه لديه أخيرًا [في الانفجار الداخلي النجمي] ظاهرة تدخل فيها

النسبية العامة بشكل كبير، وحيث سيتم زواجها الناري مع الفيزياء الكمومية». بعد ساعة من النقاش بدوت وكأنني مسخ.

أعطى ويلر الإلهام لحاشية مكونة من خمسة إلى عشرة طلاب وباحثين في مرحلة ما بعد الدكتوراه من جامعة برينستون، وهو مصدر إلهام لكنه لم يكن توجيهًا تفصيليًا. لقد افترض أننا أذكاء بما يكفي لتطوير التفاصيل بأنفسنا. اقترح على كل واحد منا مشكلة بحثية أولى، وهي مسألة قد تسفر عن قليل من الرؤى الجديدة حول الانفجار النجمي، أو الثقوب السوداء، أو «الزواج الناري» بين النسبية العامة والفيزياء الكمومية. إذا تبين أن المشكلة الأولى صعبة للغاية، فإنه يدفعا بلطف في اتجاه أسهل. إذا تبين أن الأمر سهل، فإنه سيحثنا على استخلاص كل ما نستطيع من رؤى، ثم كتابة مقال علمي عن تلك الرؤية، ومن ثم الانتقال إلى مشكلة أكثر تحديًا. وسرعان ما تعلمنا كيف نستمر في حل العديد من المشكلات في وقت واحد - مشكلة واحدة صعبة للغاية لدرجة أنه لا بد من المرور عليها وإعادة النظر فيها مرة بعد مرة على مدار عدة أشهر أو سنوات قبل أن تتصدع، ونأمل أن يكون ذلك بمكافأة كبيرة؛ وغيرها من المشكلات أسهل بكثير، مع عوائد أسرع. خلال كل ذلك، لم يقدم ويلر سوى ما يكفي من النصائح لمنعنا من التخطئ التام، ولم تكن تلك النصائح كثيرة لدرجة أننا شعرنا أننا قد حللنا المشكلات نيابةً عنا.

مشكلتي الأولى كانت اللولو: خذ قضيبًا مغناطيسيًا ذا مجال مغناطيسي يمر عبره ويخرج من طرفه. يتكون المجال من خطوط المجال، والتي نعلمها للأطفال بجعلها مرئية باستخدام برادة الحديد على قطعة من الورق مع وضع المغناطيس تحتها (الشكل 7.1 a). خطوط المجال المتجاورة تتنافر. (نشعر بالتنافر عندما يدفع المرء أحد القطبين الشماليين لمغناطيسين تجاه الآخر). تثبت خطوط المجال المغناطيسي لكل مغناطيس معًا، على الرغم من تنافرها المتبادل، بواسطة حديد المغناطيس. أزل الحديد، وسوف يؤدي تنافرها إلى انفجار خطوط المجال (الشكل 7.1 b). كل هذا كان مألوفًا بالنسبة إليّ خلال دراستي الجامعية. ذكرني ويلر بذلك في مناقشة خاصة طويلة في مكتبه في برينستون. ثم وصف الاكتشاف الأخير الذي قام به صديقه البروفيسور مايل ملفين في جامعة ولاية فلوريدا في تالاهاسي.



7.1 (a) خطوط المجال المغناطيسي حول قضيب المغناطيس، والتي تظهر بواسطة برادة الحديد الموجودة على قطعة من الورق والمغناطيس تحتها. (b) نفس خطوط المجال، مع إزالة الورقة والمغناطيس. الضغط بين خطوط المجال المتجاورة يجعلها تنفجر في اتجاهات الأسهم المتموجة. (c) حزمة أسطوانية طويلة لا متناهية من خطوط المجال المغناطيسي، مجالها عالي الشدة لدرجة أن طاقتها تخلق ما يكفي من انحناء الزمكان (الجاذبية) لتثبيت الحزمة معاً، على الرغم من التنافر بين خطوط المجال. (d) حدسية ويلر أنه عندما تضغط حزمة خطوط المجال في (c) قليلاً، فإن جاذبيتها تصبح قوية جداً بحيث تضغط الحزمة إلى الانفجار الداخلي (الخطوط المتعرجة).

لقد أظهر ملفين، باستخدام معادلة أينشتاين للمجال، أنه لا يمكن ربط خطوط المجال المغناطيسي بعضها ببعض ضد انفجار الحديد الموجود في قضيب مغناطيسي فحسب، بل يمكن أيضاً تجميعها معاً بواسطة الجاذبية من دون مساعدة أي مغناطيس. السبب بسيط: المجال المغناطيسي لديه طاقة، وطاقته تنجذب. [لمعرفة سبب جاذبية الطاقة، تذكر أن الطاقة والكتلة «متكافئتان» (الإطار 5.2): من الممكن تحويل كتلة من أي نوع (يورانيوم، هيدروجين، أو أي شيء آخر) إلى طاقة؛ والعكس، من الممكن تحويل الطاقة من أي نوع (الطاقة المغناطيسية، الطاقة الانفجارية، أو أي شيء آخر) إلى كتلة. وبالتالي، بالمعنى العميق، الكتلة والطاقة هما مجرد اسمين مختلفين لنفس الشيء، وهذا يعني أنه بما أن جميع

أشكال الكتلة تنتج الجاذبية، يجب أن تنتج جميع أشكال الطاقة الجاذبية أيضًا. معادلة مجال أينشتاين، عند فحصها بعناية، تصر على ذلك. الآن، إذا كان لدينا مجال مغناطيسي شديد الكثافة - مجال أعلى كثافة بكثير من أي مجال واجهته على الأرض - فإن الطاقة المكثفة للمجال ستنتج جاذبية شديدة، وهذه الجاذبية ستنتج انضغاطًا للمجال سوف يحافظ على خطوط المجال معًا على الرغم من الضغط بينهما (الشكل 7.1c). كان هذا اكتشاف ملفين. أخبره حدس ويلر أن خطوط المجال «المجمعة بفعل الجاذبية» قد تكون غير مستقرة مثل قلم رصاص واقف على طرفه: ادفع قلم الرصاص قليلًا، وستجعله الجاذبية يسقط. اضغط خطوط المجال المغناطيسي قليلًا، وقد تطفئ الجاذبية على ضغطها، وتسحبها إلى الانفجار الداخلي (الشكل 7.1d). انفجار إلى ماذا؟ ربما لتشكيل ثقب أسود أسطواني طويل إلى ما لا نهاية؛ ربما لتشكّل مفردة عارية m (مفردة بلا أفق يحجبها).

لم يكن يهم ويلر أن المجالات المغناطيسية في الكون الحقيقي أضعف من أن تتمكن الجاذبية من تجميعها معًا ضد الانفجار. لم يكن يسعى ويلر هو فهم الكون كما هو موجود، بل فهم القوانين الأساسية التي تحكم الكون. ومن خلال طرح مشكلات مثالية تدفع تلك القوانين إلى أقصى الحدود، توقع أن يكتسب رؤى جديدة حول القوانين. وبهذه الروح، عرض عليّ أول مشكلة بحثية تتعلق بالجاذبية: استخدم معادلة مجال أينشتاين لمحاولة استنتاج ما إذا كانت حزمة خطوط المجال المغناطيسي الخاصة بملفين سوف تنفجر، وإذا كان الأمر كذلك، فإلى ماذا.

لعدة أشهر ناضلت مع هذه المشكلة. كان مشهد الصراع في أثناء النهار له الغلبة في مختبر بالمر الفيزيائي في برينستون، حيث كنت أتناقص مكتبًا ضخمًا مع طلاب الفيزياء الآخرين وناقاسم مشكلاتنا بعضنا مع بعض، في صداقة حميمة من الأخذ والعطاء اللفظي. كان الصراع الليلي في الشقة الصغيرة، في ثكنة عسكرية تحولت خلال الحرب العالمية الثانية، حيث كنت أعيش مع زوجتي ليندا (فنانة وطالبة رياضيات)، وابتتنا الصغيرة كاريس، وكلبنا الكولي الضخم، برنس. كل يوم كنت أحمل المشكلة معي ذهابًا وإيابًا بين ثكنات الجيش وسندرة المختبر. كل بضعة أيام كنت أتصل بويلر للحصول على النصيحة. لقد تغلبت على المشكلة بالقلم الرصاص والورق. لقد تغلبت على ذلك بالحسابات الرقمية على الحاسوب. كنت أتغلب على ذلك في جدالات طويلة على السبورة مع زملائي الطلاب؛ وبالتدرّج أصبحت الحقيقة واضحة. معادلة أينشتاين،

التي تعرضت للضرب والتلاعب والتشويه بسبب ضربي، أخبرني أخيراً أن تخمين ويلر كان خاطئاً. وبصرف النظر عن مدى قوة الضغط عليها، فإن حزمة ملفين الأسطوانية من خطوط المجال المغناطيسي ستعود دائماً إلى الخلف. لا يمكن للجاذبية أبداً التغلب على الضغط الطارد للمجال. لا يوجد انفجار داخلي.

كانت هذه أفضل نتيجة ممكنة، أوضح لي ويلر بحماس: عندما تؤكد عملية حسابية توقعات المرء، فإن المرء لا يؤدي إلا إلى تعزيز فهمه البديهي لقوانين الفيزياء. ولكن عندما تتعارض الحسابات مع التوقعات، يكون المرء في الطريق نحو رؤية جديدة.

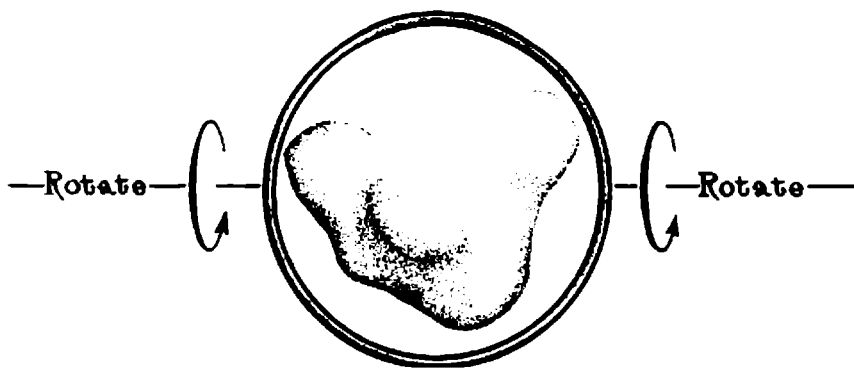
كان التناقض بين النجم الكروي وحزمة ملفين الأسطوانية من خطوط المجال المغناطيسي شديداً، وأدركت أنا وويلر: عندما يكون النجم الكروي مضغوطاً للغاية، فإن الجاذبية بداخله تطفئ على أي ضغط داخلي يمكن أن يحشده النجم. إن الانفجار الداخلي للنجوم الكروية الضخمة أمر إلزامي (الفصل الخامس). على النقيض من ذلك، بصرف النظر عن مدى قوة الضغط على حزمة أسطوانية من خطوط المجال المغناطيسي، وبصرف النظر عن مدى ضغطها للمقطع العرضي الدائري للحزمة (الشكل 7.1 d)، فإن ضغط الحزمة سوف يتغلب دائماً على الجاذبية ويدفع خطوط المجال إلى الخارج. انفجار خطوط المجال المغناطيسي الأسطوانية محظور؛ لا يمكن أن يحدث أبداً.

لماذا تتصرف النجوم الكروية والمجال المغناطيسي الأسطواني بشكل مختلف تماماً؟ شجعني ويلر على استكشاف هذا السؤال من كل اتجاه ممكن؛ قد تجلب الإجابة نظرة عميقة لقوانين الفيزياء. لكنه لم يخبرني بكيفية التحقق. لقد أصبحت باحثاً مستقلاً. كان يعتقد أنه سيكون من الأفضل بالنسبة إليّ أن أطوّر استراتيجية البحث الخاصة بي من دون مزيد من التوجيه منه. الاستقلال يولد القوة.

من عام 1963 إلى عام 1972، خلال معظم العصر الذهبي، كافحت لفهم التناقض بين-النجوم الكروية والمجالات المغناطيسية الأسطوانية، ولكن فقط على فترات متقطعة. كان السؤال عميقاً وصعباً، وكانت هناك قضايا أخرى أسهل للدراسة ببذل معظم جهدي: نبضات النجوم، وموجات الجاذبية التي يجب أن تبعثها النجوم عندما تنبض، وتأثيرات انحناء الزمكان على مجموعات ضخمة من النجوم وعلى انفجارها. وفي خضم تلك الدراسات، كنت أسحب من درج مكتبي، مرة أو مرتين في السنة، أكوام مجلدات

أنشئ طوقاً بمحيط يساوي المحيط الحرج للجسم الذي اخترته. ثم حاول وضع الجسم في منتصف الطوق، وحاول تدوير الطوق بالكامل حول الجسم. إذا نجحت، يجب أن يكون الجسم قد أنشأ بالفعل أفقاً للثقب الأسود حول نفسه. إذا فشلت، فهذا يعني أن الجسم ليس مضغوطاً بدرجة كافية لتكوين ثقب أسود.

بمعنى آخر، تدعى نظرية الطوق أنه إذا ضُغَطَ جسم ما (نجم أو عنقود نجمي أو أي شيء آخر) بطريقة غير كروية، فإن الجسم سيشكّل ثقباً أسود حول نفسه عندما، وفقط عندما، يصبح محيطه في جميع الاتجاهات أقل من المحيط الحرج.



7.2 وفقاً لحدسية الطوق، يشكّل الجسم المتفجر ثقباً أسود عندما، وفقط عندما، يمكن وضع طوق بمحيط حرج حول الجسم وتدويره.

لقد اقترحت حدسية الطوق هذا في عام 1972. ومنذ ذلك الحين، حاولت أنا وآخرون جاهدين معرفة ما إذا كان صحيحاً أم لا. الجواب مدفون في معادلة المجال لأينشتاين، لكن استخلاص الجواب كان صعباً للغاية. في هذه الأثناء، استمرت الأدلة غير المباشرة لصالح حدسية الطوق في التزايد. في الآونة الأخيرة، في عام 1991، حاكى ستيفن شابيرو وشاول تيوكولسكي من جامعة كورنيل انفجار نجم غير كروي على جهاز حاسوب فائق السرعة، ورأيا ثقباً سوداء تتشكل حول النجم المتفجر على وجه التحديد عندما تنبأت حدسية الطوق بذلك. إذا أمكن وضع طوق على النجم المتفجر وتدويره، يتشكل ثقباً أسود؛ إذا لم يكن الأمر كذلك، لا يوجد ثقب أسود. لكن لم تحاك سوى عدد قليل من هذه النجوم بأشكال خاصة غير كروية. لذلك، ما زلنا لا نعرف على وجه اليقين، بعد مرور ربع قرن تقريباً على اقتراحها، ما إذا كانت حدسية الطوق صحيحة، لكنها تبدو واعدة.

كان إيجور دميترييفيتش نوفيكوف - في كثير من النواحي - النظرير السوفيتي لي، تمامًا كما كان ياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيش نظير ويلر. في عام 1962، عندما التقيت ويلر لأول مرة وبدأت مسيرتي المهنية تحت إشرافه، كان نوفيكوف يلتقي زيلدوفيش لأول مرة وأصبح عضوًا في فريقه البحثي.

في حين أنني عشت حياة مبكرة بسيطة وداعمة - حيث ولدت وترعرعت في عائلة موروونية كبيرة و متماسكة في لوجان بولاية يوتا- فإن إيجور نوفيكوف كان يعاني من ظروف قاسية. في عام 1937، عندما كان إيجور في الثانية من عمره، وقع والده -الذي كان مسؤولاً رفيع المستوى في وزارة السكك الحديدية في موسكو- في شرك إرهاب ستالين العظيم، واعتُقل وأُعدم (فهو أقل حظًا من لاندau). نجت والدته. أُرسلت إلى السجن ثم المنفى، وترى إيجور على يد عمته. (كانت مثل هذه المآسي العائلية في عصر ستالين شائعة بشكل مخيف بين أصدقائي وزملائي الروس).

في أوائل الستينيات، حينما كنت أدرس الفيزياء كطالب جامعي في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، كان إيجور يدرسها كطالب دراسات عليا في جامعة موسكو.

في عام 1962، حينما كنت أستعد للذهاب إلى برينستون للدراسة العليا وإجراء بحث في النسبية العامة مع جون ويلر، حذرني أحد أساتذتي في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا من هذا المقرر: النسبية العامة ليست لها علاقة تُذكر بالكون الحقيقي، كما حذرني؛ ينبغي للمرء أن يبحث في مكان آخر عن تحديات الفيزياء المثيرة للاهتمام. (كان هذا عصر الشكوك العظيمة حول الثقوب السوداء وعدم الاهتمام بها). وفي نفس الوقت في موسكو، كان إيجور يكمل درجة الكانديات (الدكتوراه) في تخصص النسبية العامة، ومعه زوجته نورا -وهي أيضًا عالمة فيزياء- التي حذرها أصدقائها من أن النسبية كانت راکدة ولا علاقة لها بالكون الحقيقي وعلى زوجها أن يتركها (النسبية العامة) من أجل حياته المهنية.

وبينما أتجاهل هذه التحذيرات وأمضي قدمًا إلى برينستون، اغتنمت نورا، التي شعرت بالقلق من التحذيرات، الفرصة في مؤتمر للفيزياء في إستونيا للحصول على نصيحة من عالم الفيزياء الشهير ياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيش. اعتقدت أن زيلدوفيش خارج الاهتمام بهذا الجانب من الفيزياء وسألته عما إذا كان يعتقد أن النسبية العامة لها أي أهمية. أجاب زيلدوفيش، بطريقته الديناميكية والقوية، أن النسبية ستصبح في غاية

الأهمية لأبحاث الفيزياء الفلكية. ثم وصفت نورا فكرة كان زوجها يعمل عليها، وهي فكرة أن الانفجار الداخلي لنجم لتكوين ثقب أسود قد يكون مشابهًا لأصل الانفجار الأعظم لكوننا، ولكن مع مرور الوقت يتحول ويعود إلى الوراء 3. بينما تتحدث نورا، أصبح زيلدوفيش متحمسًا أكثر فأكثر. لقد طور هو نفسه نفس الفكرة وكان يستكشفها.

وبعد بضعة أيام، اقتحم زيلدوفيش مكتبًا تقاسمه إيجور نوفيكونوف مع العديد من الطلاب الآخرين في معهد شترنبرج الفلكي بجامعة موسكو، وبدأ في استجواب نوفيكونوف بشأن أبحاثه. على الرغم من أن أفكارهما كانت متشابهة، فإن أساليب بحثهما كانت مختلفة تمامًا. وقد استخدم نوفيكونوف، وهو بالفعل خبير كبير في النسبية، حسابات رياضية أدق لإثبات التشابه بين الانفجار الأعظم والانفجار النجمي. لقد أثبت زيلدوفيش -الذي لم يكن يعرف أي نسبة تقريبيًا- ذلك باستخدام رؤية فيزيائية عميقة وحسابات بدائية. أدرك زيلدوفيش أن هذا هو المكان المثالي للمواهب. كان قد خرج للتو من حياته كمخترع ومصمم للأسلحة النووية، وبدأ في بناء فريق جديد من الباحثين، فريق للعمل على حبه الجديد: الفيزياء الفلكية. سيكون نوفيكونوف، باعتباره أستاذًا في النسبية العامة، عضوًا مثاليًا في الفريق.

وعندما تردد نوفيكونوف، الذي كان سعيدًا في جامعة موسكو، في التسجيل، مارس زيلدوفيش ضغوطًا. ذهب إلى مستيسلاف كيلديش، مدير معهد الرياضيات التطبيقية حيث كان فريق زيلدوفيش يتجمع؛ اتصل كيلديش هاتفياً بفان بتروفسكي، رئيس جامعة موسكو، وأرسل بتروفسكي في طلب نوفيكونوف. دخل نوفيكونوف بخوف إلى مكتب بتروفسكي، في أعلى البرج المركزي للجامعة، وهو المكان الذي لم يتخيل نوفيكونوف قط أن يغامر بالذهاب إليه. قال بتروفسكي بلغة صريحة: «ربما لا ترغب الآن في مغادرة الجامعة للعمل مع زيلدوفيش، لكنك سترغب في ذلك». سجل نوفيكونوف، وعلى الرغم من بعض الأوقات الصعبة، لم يندم قط على ذلك.

كان أسلوب زيلدوفيش كمرشد لعلماء الفيزياء الفلكية الشباب هو الأسلوب الذي طوره في أثناء عمله مع فريق تصميم الأسلحة النووية: «[أفكار] زيلدوفيش شرارة وفريقه هو الوقود» - ما لم يتمكن عضو آخر في الفريق من ذلك. يتنافسون في اختراع الأفكار (كما كان يفعل نوفيكونوف عادةً، عندما يتعلق الأمر بالنسبية). بعد ذلك، سيتبنى زيلدوفيش فكرة زميله الشاب بحماس وي طرحها مع الفريق بدفعة قوية وبحيادية، مما يصل بالفكرة بسرعة إلى مرحلة النضج ويجعلها ملكية مشتركة له ولمخترعها.

لقد وصف نوفيكون أسلوب زيلدوفيش بوضوح. يقول نوفيكون، وهو ينادي معلمه بالاسم الأول بالإضافة إلى اسم العائلة المختصر (وهو شكل من أشكال المخاطبة الروسية التي تتسم بالاحترام والحميمية في ذات الوقت): «كان ياكوف بوريسيتش يوقظني في كثير من الأحيان عبر الهاتف في الساعة الخامسة أو السادسة صباحًا. هل لديك فكرة جديدة! فكرة جديدة! تعال إلى شقتي! دعنا نتحدث! سأذهب إليه وستحدث لفترة طويلة جدًا. اعتقد ياكوف بوريسيتش أننا جميعًا نستطيع العمل ما دام هو يستطيع. كان يعمل مع فريقه من السادسة صباحًا إلى العاشرة صباحًا على سبيل المثال، في موضوع واحد. ثم موضوع جديد حتى الغداء. بعد الغداء كنا نقوم بنزهة قصيرة أو ممارسة الرياضة أو قيلولة قصيرة. ثم القهوة والمزيد من التفاعل حتى الخامسة أو السادسة. وفي المساء كانت لدينا الحرية في الحساب أو التفكير أو الكتابة استعدادًا لليوم التالي».

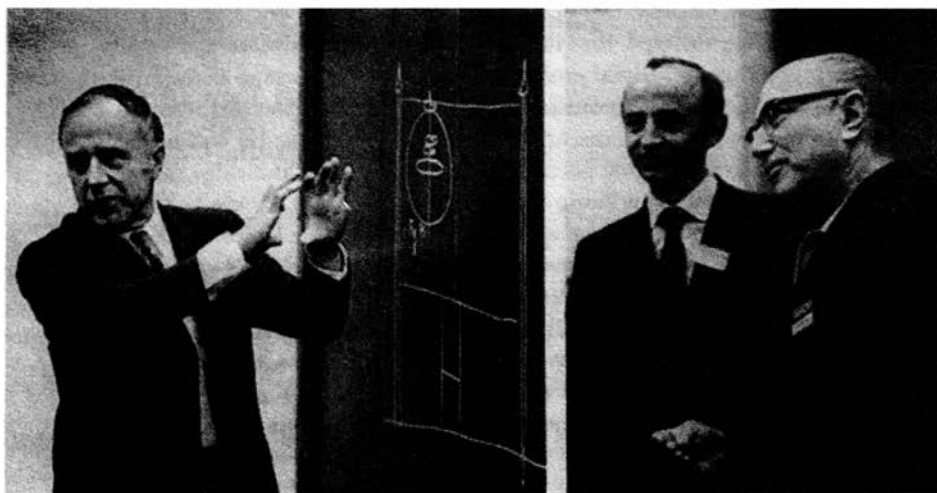
استمر زيلدوفيش، الذي كان مدللًا في أيام تصميم الأسلحة، في مطالبة العالم بالتكيف معه: اتبع جدول الزمني، وابدأ العمل عندما يبدأ، وخذ قيلولته عندما يأخذ قيلولته. (في عام 1968، قضيت أنا وجون ويلر وأندريه ساخاروف فترة ما بعد الظهر في مناقشة الفيزياء معه في غرفة فندق في أقصى جنوب الاتحاد السوفيتي. وبعد عدة ساعات من المناقشة المكثفة، أعلن زيلدوفيش فجأة أن الوقت قد حان للنوم ثم استلقى ونام لمدة عشرين دقيقة، بينما كنت أنا وويلر وساخاروف نسترخي ونقرأ بهدوء في زوايا الغرفة، في انتظار أن يستيقظ).

لقد نفذ صبره مع منشدي الكمال مثلي، الذين يصرون على الحصول على جميع تفاصيل العملية الحسابية بشكل صحيح، وكان يهتم فقط بالمفاهيم الأساسية. ومثل أوبنهايمر، كان بإمكانه نشر التفاصيل غير ذات الصلة في مهب الريح والتركيز - من دون خطأ تقريبًا - على القضايا المركزية. بضعة أسهم ومنحنيات على السبورة، ومعادلة لا تزيد على نصف سطر، وبضع جمل من النشر المفعم بالحياة، وبواسطة هذه الأشياء كان بإمكانه أن يوصل فريقه إلى قلب مشكلة البحث.

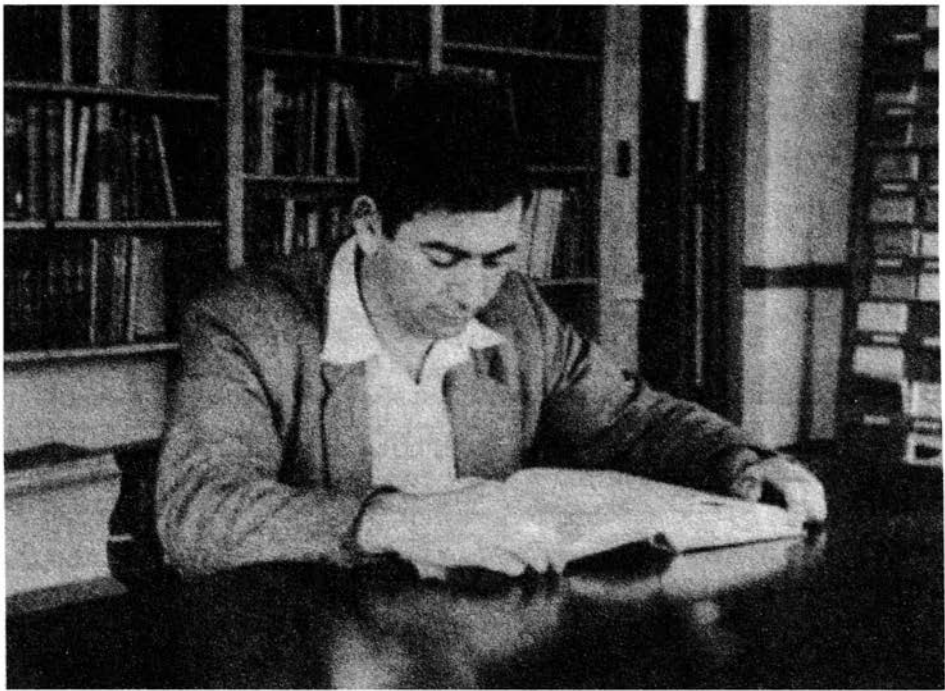
كان سريعًا في الحكم على فكرة أو قيمة عالم فيزياء، وكان بطيئًا في تغيير أحكامه. كان بإمكانه الاحتفاظ بإيمانه بحكم سريع خاطئ لسنوات، وبالتالي يعمي نفسه عن حقيقة مهمة، كما حدث عندما رفض فكرة أن الثقوب السوداء الصغيرة يمكن أن تتبخر (الفصل الثاني عشر). ولكن حين (كما كانت الحال عادة) تصبح أحكامه السريعة صحيحة، فقد تمكن من المضي قدمًا عبر حدود المعرفة بوتيرة هائلة، أسرع من أي شخص قابلته في حياتي.

كان التناقض بين زيلدوفيش وويلر صارخًا: فقد ساعد زيلدوفيش في تشكيل فريقه بيد قوية، وواصل مستمر من أفكاره الخاصة، واستغلال مشترك لأفكار فريقه. قدم ويلر لفراخه أجواءً فلسفية، وإحساسًا بوجود أفكار مثيرة في كل مكان، جاهزة للحصاد، لكنه نادرًا ما كان يفرض فكرة ما بشكل ملموس على الطالب، ولم ينضم مطلقًا إلى طلابه في استغلال أفكارهم. كان هدف ويلر الأسمى هو تعليم دجاجاته، حتى لو أدى ذلك إلى إبطاء وتيرة الاكتشاف. سعى زيلدوفيش -الذي لا يزال مشبعًا بروح السباق نحو القنبلة العملاقة- إلى تحقيق أسرع وتيرة ممكنة، مهما كانت الكلفة.

كان زيلدوفيش يتحدث عبر الهاتف في ساعات الصباح الشريفة، يطالب بالاهتمام، ويطالب بالتفاعل، ويطالب بالتقدم. بدا لنا ويلر، نحن صغاره، أكثر الرجال انشغالًا في العالم؛ مشغول جدًا بمشاريعه الخاصة بحيث لا يتطلب اهتمامنا. ومع ذلك، كان متاحًا دائمًا بناءً على طلبنا، ليقدم لنا النصيحة والحكمة والتشجيع.



اليسار: جون أرثيبالد ويلر، كاليفورنيا. 1970. إلى اليمين: إيجور دميترييفيتش نوفيكوف وياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيش في عام 1962. [اليسار: بإذن من مختبرات جوزيف هنري، جامعة برينستون؛ اليمين: إهداء تشاندراسخار].



دينيس سياما في عام 1955. [إهداء من دينيس دبليو سياما].

كان لدى دينيس سياما، المرشد العظيم الثالث في ذلك العصر، أسلوب مختلف. لقد كرس الستينيات وأوائل السبعينيات حصريًا تقريبًا لتوفير بيئة مثالية لطلابه في جامعة كامبريدج ليرعرعوا فيها. ولأنه نقل أبحاثه الشخصية ومسيرته المهنية إلى المرتبة الثانية، بعد أبحاث طلابه، لم يترقَّ قط إلى هذا المنصب المهيّب «أستاذ» في كامبريدج (وهو منصب أعلى بكثير من أن تكون أستاذًا في أمريكا). لقد كان طلابه - أكثر منه بكثير - هم الذين حصدوا الثمار والشهرة. بحلول نهاية السبعينيات، كان اثنان من طلابه السابقين، ستيفن هوكينج ومارتن ريس، أستاذين في جامعة كامبريدج.

كان سياما محفّزًا. لقد أبقى طلابه على اتصال وثيق بأهم التطورات الجديدة في الفيزياء في جميع أنحاء العالم. كلما نُشر اكتشاف مثير للاهتمام، كان يكلف أحد الطلاب بقراءته وتقديم تقرير عنه للآخرين. كلما تحدد موعد لإلقاء محاضرة مثيرة للاهتمام في لندن، كان يصطحب أو يرسل حاشيته من الطلاب بالقطار للاستماع إليها. كان يتمتع بحس

جيد للغاية بشأن الأفكار المثيرة للاهتمام، وما هي القضايا التي تستحق المتابعة، وما الذي يجب على المرء قراءته للبدء في أي مشروع بحثي، ومن يجب على المرء أن يذهب إليه للحصول على المشورة الفنية.

كان سياما مدفوعاً برغبة يائسة في معرفة كيفية تكوين الكون. هو نفسه وصف هذا الدافع بأنه نوع من القلق الميتافيزيقي. بدا الكون مجنوناً وغريباً ورائعاً لدرجة أن الطريقة الوحيدة للتعامل معه هي محاولة فهمه، وأفضل طريقة لفهمه هي من خلال طلابه. من خلال جعل طلابه يحلون المشكلات الأكثر تحدياً، يمكنه الانتقال من قضية إلى أخرى بسرعة أكبر مما لو توقف مؤقتاً لمحاولة حلها بنفسه.

الثقوب السوداء ليس لها شعر

ومن بين اكتشافات العصر الذهبي، كان من أعظمها أن «الثقب الأسود ليس له شعر». (وسيتضح معنى هذه العبارة تدريجياً في الصفحات القادمة). بعض الاكتشافات في العلم تحدث بسرعة على يد الأفراد؛ والبعض الآخر يظهر ببطء نتيجة لمساهمات متنوعة من العديد من الباحثين. وكان انعدام شعر الثقوب السوداء من النوع الثاني. لقد ظهر هذا الموضوع إلى الوجود عبر البحث الذي أجرته السلالة الفكرية للمرشدين العظماء الثلاثة، زيلدوفيتش، وويلر، وسياما، ومن البحث الذي أجراه كثيرون آخرون. وفي الصفحات التالية، سنشاهد هذا العدد الهائل من الباحثين وهم يكافحون خطوة بخطوة، شيئاً فشيئاً، لصياغة مفهوم انعدام شعر الثقب الأسود، وإثباته، وفهم مضامينه.

أول تلميحات أن «الثقب الأسود ليس له شعر» جاء في عام 1964، من فيتالي لازاريفيتش جينزبرج، الرجل الذي اخترع وقود LiD للقبلة الهيدروجينية السوفيتية، والذي حرره تواطؤ زوجته المزعوم في مؤامرة لقتل ستالين من مزيد من أعمال تصميم القبلة الفائقة (الفصل السادس). اكتشف علماء الفلك في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا للتو النجوم الزائفة، وهي أجسام غامضة ومتفجرة في أبعد حدود الكون، وكان جينزبرج يحاول فهم كيفية تزويد النجوم الزائفة بالطاقة (الفصل التاسع). يعتقد جينزبرج أن أحد الاحتمالات قد يكون انفجار نجم ممغنط فائق الكتلة لتكوين ثقب أسود. سيكون لخطوط المجال المغناطيسي لمثل هذا النجم الشكل الموضح في الجزء العلوي من الشكل 7.3 a، وهو نفس شكل خطوط

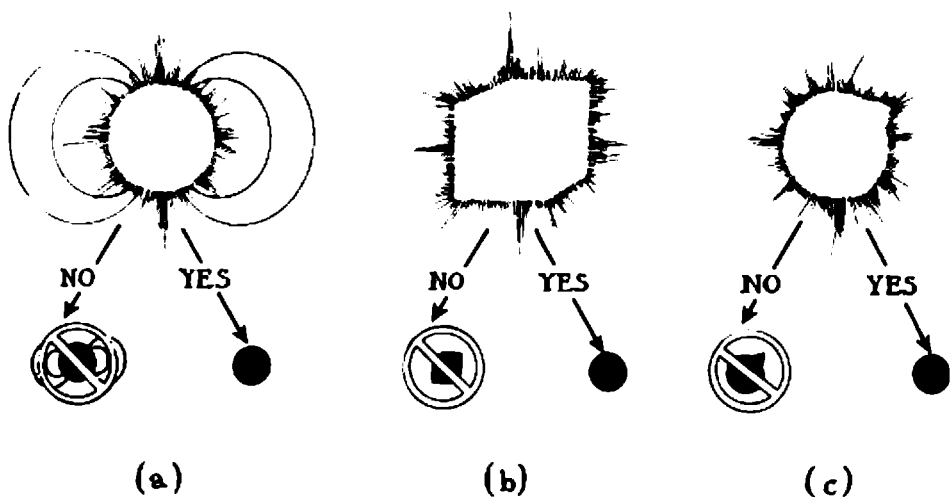
المجال المغناطيسي للأرض. عندما ينفجر النجم، قد تصبح خطوط مجاله مضغوطة بشدة ثم تنفجر بعنف، مما يؤدي إلى إطلاق طاقة هائلة، كما توقع جينزبرج؛ وهذا قد يساعد في تفسير النجوم الزائفة.



على اليسار: فيتالي لازاريفيتش جينزبرج (عام 1962 تقريبًا)، الشخص الذي قدم أول دليل على «حدسية عدم وجود شعر». على اليمين: فيرنر إسرائيل (في عام 1964)، الشخص الذي ابتكر أول دليل صارم على صحة «حدسية عدم وجود شعر». [يسار: إهداء فيتالي جينزبرج؛ على اليمين: إهداء لفيرنر إسرائيل.]

كان من الصعب للغاية اختبار هذه التكهنات من خلال حساب التفاصيل الكاملة للانفجار الداخلي للنجم، لذا قام جينزبرج بالشيء الثاني الأفضل. مثل أوبنهايمر في استكشافه الأول لما يحدث عندما ينفجر نجم (الفصل السادس)، فحص جينزبرج سلسلة من النجوم الساكنة، كل واحدة منها أكثر إحكامًا من سابقتها، وجميعها لها نفس العدد من خطوط المجال المغناطيسي التي تمر عبر باطنها. يعتقد جينزبرج أن هذا التسلسل من النجوم الساكنة يجب أن يحاكي نجمًا واحدًا منفجرًا. استنتج جينزبرج صيغة تصف

أشكال خطوط المجال المغناطيسي لكل نجم من النجوم في تسلسله، ووجد مفاجأة كبيرة. حينما كان النجم على وشك الوصول إلى محيطه الحرج وبدأ في تشكيل ثقب أسود حول نفسه، امتصت جاذبيته خطوط المجال المغناطيسي للأسفل من سطحه، مما أدى إلى التصاقها هناك بإحكام. عندما تشكل الثقب الأسود، كانت خطوط المجال الملتصقة كلها داخل أفق الثقب الأسود. ولم تبقَ أي خطوط مجال بارزة خارج الثقب (الشكل 7.3 a). لم يشير هذا بالخير لفكرة جينزبرج حول كيفية تزويد النجوم الزائفة بالطاقة، لكنه اقترح احتمالاً مثيراً للاهتمام: عندما ينفجر نجم ممغنط ليشكل ثقباً أسود، فقد يولد الثقب من دون مجال مغناطيسي على الإطلاق.



7.3 بعض الأمثلة على «حدسية عدم وجود شعر»: (a) عندما ينفجر نجم ممغنط، لا يكون للثقب الذي يشكله مجال مغناطيسي. (b) عندما ينفجر نجم مربع، فإن الثقب الذي يشكله يكون دائرياً وليس مربعاً. (c) عندما ينفجر نجم يوجد على سطحه جبل، فإن الثقب الذي يشكله لا يحتوي على جبل.

في الوقت الذي كان فيه جينزبرج يكتشف هذا، على بُعد بضعة كيلومترات فقط في موسكو، بدأ فريق زيلدوفيتش - مع تولي إيجور نوفيكوف وأندريه دوروشكيفيتش زمام المبادرة - يسألون أنفسهم: «بما أن النجم المستدير ينتج ثقباً دائرياً عندما ينفجر من الداخل فهل سينتج عن النجم المشوه ثقب مشوه؟»، وكمثال متطرف، هل ينتج النجم المربع ثقباً مربعاً؟ (الشكل 7.3 b). إن حساب الانهيار الداخلي لنجم مربع افتراضي

سيكون أمرًا صعبًا للغاية، لذلك ركز دوروشكيفيتش ونوفيكوف وزيلدوفيش على مثال أسهل: عندما يتفجر نجم شبه كروي فيبرز جبل صغير فوق سطحه، هل يحتوي الثقب الذي سيسكله على تنوء مثل الجبل فوق أفقه؟ ومن خلال السؤال عن النجوم شبه الكروية ذات الجبال الصغيرة، تمكن فريق زيلدوفيش من تبسيط حساباتهم إلى حد كبير؛ يمكنهم استخدام تقنيات رياضية تسمى أساليب الانقلاب، والتي كان جون ويلر وباحث ما بعد الدكتوراه، توليو ريج، رائدين فيها قبل بضع سنوات. صُممت طرق الانقلاب هذه -والتي شُرح القليل عنها في الإطار 7.1 - بعناية لدراسة أي «تقلب» صغير (أي اضطراب صغير) في حالة كروية. إن تشوه الجاذبية الناجم عن جبل صغير فوق النجم الذي اقترحه فريق زيلدوفيش مجرد اضطراب.

بسَّط دوروشكيفيتش ونوفيكوف وزيلدوفيش حساباتهم بشكل أكبر بنفس الحيلة التي استخدمها أوبنهايمر وجينزبرج: فبدلاً من محاكاة الانفجار الداخلي الديناميكي الكامل لنجم ذي جبل، فحسبوا فقط سلسلة من النجوم الجبلية الثابتة، كل واحد منها أكثر انضغاطاً من السابق. بهذه الحيلة، وتقنيات الانقلاب، ومع الأخذ والرد المكثف بينهم، اكتشف دوروشكيفيتش ونوفيكوف وزيلدوفيش بسرعة نتيجة رائعة: عندما يكون النجم الساكن المحاط بالجبل صغيراً بما يكفي ليشكّل ثقباً أسود حول نفسه، فإن أفق الثقب يجب أن يكون مستديراً تماماً من دون أي بروز (الشكل 7.3 c).

وبالمثل، كان من المغري التخمين أنه إذا كان النجم المربع المتفجر يشكّل ثقباً أسود، فإن أفقه سيكون أيضاً مستديراً، وليس مربعاً (الشكل 7.3 b). إذا كان هذا التخمين صحيحاً، لا ينبغي أن يحمل الثقب الأسود أي دليل على الإطلاق عما إذا كان النجم الذي أنتجه مربعاً، أو مستديراً، أو جبلياً، وأيضاً (بحسب جينزبرج) لا يوجد دليل على ما إذا كان النجم ممغنطاً أم معدوم المغناطيسية.

بعد بضع سنوات، عندما تبين تدريجياً أن هذا التخمين صحيح، اخترع جون ويلر عبارة بليغة لوصفه: الثقب الأسود ليس له شعر، فالشعر هو أي شيء قد يخرج من الثقب ليكشف عن تفاصيل النجم الذي تشكل منه.

الإطار 7.1

شرح طرق التقلب للقراء الذين يحبون الجبر

في الجبر، يتعلم المرء حساب مربع مجموع رقمين، a و b ، من الصيغة

$$(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2.$$

لنفترض أن a عدد كبير، على سبيل المثال 1000، وأن b صغير جدًا بالمقارنة، على سبيل المثال 3. فإن الحد الثالث في هذه الصيغة، b^2 ، سيكون صغيرًا جدًا مقارنة بالحدين الآخرين وبالتالي يمكن التخلص منه من دون ارتكاب الكثير من الأخطاء:

$$(1000 + 3)^2 = 1000^2 + 2 \times 1000 \times 3 + 3^2 = 1,006,009$$

$$\simeq 1000^2 + 2 \times 1000 \times 3 = 1,006,000.$$

تعتمد طرق التقلب على هذا التقريب. إن كان $a = 1000$ يشبه نجمًا كرويًا بدقة، و $b = 3$ يشبه جبل النجم الصغير، فإن

$$(a + b)^2 \text{ يشبه انحناء الزمكان الذي ينتجه النجم والجبل معًا.}$$

في حساب هذا الانحناء، تحافظ طرق التقلب فقط على التأثيرات الخطية في خصائص الجبل.

(تأثيرات مثل $2ab = 6000$ ، وهي خطية عند $b = 3$)؛ تتخلص هذه الطرق من جميع تأثيرات الجبل الأخرى (تأثيرات مثل $b^2 = 9$). وما دام الجبل ظل صغيرًا مقارنة بالنجم، فإن طرق الاضطراب تكون دقيقة للغاية. ومع ذلك، إذا نما الجبل إلى حجم بقية النجم (كما يجب أن يحدث لجعل النجم مربعًا وليس مستديرًا)، فإن طرق الاضطراب ستنتج أخطاء كبيرة - (طرح) أخطاء مثل تلك الموجودة في الصيغ المذكورة أعلاه، حيث:

$$a = 1000 \text{ and } b = 1000$$

$$(1000 + 1000)^2 = 1000^2 + 2 \times 1000 \times 1000 + 1000^2 = 4,000,000$$

تختلف هاتان النتيجةتان بشكل كبير.

من الصعب أن يصدق أغلب زملاء ويلر أن هذا الرجل المحافظ شديد اللياقة كان على علم بالتفسير الإباحي لعبارته. لكنني أشك في خلاف ذلك؛ لقد رأيت نزعة الشيطانية على انفراد في مناسبات نادرة. وسرعان ما ترسخت عبارة ويلر، على الرغم من مقاومة سيمون باسترناك -رئيس تحرير دورية المراجعات الفيزيائية- وهي الدورية التي تنشر فيها معظم الأبحاث الغربية حول الثقوب السوداء. وعندما حاول فيرنر إسرائيل استخدام هذه العبارة في ورقة بحثية فنية في أواخر عام 1969، أطلق باسترناك ملاحظة قاطعة مفادها أنه لن يسمح بأي حال من الأحوال بمثل هذه الألفاظ البذيئة في يومياته. لكن باسترناك لم يستطع أن يوقف طوفان الأوراق «عن اللا شعر» لفترة طويلة. وفي فرنسا والاتحاد السوفييتي، حيث اعتُبرت الترجمات الفرنسية والروسية لعبارة ويلر أيضًا بغیضة، استمرت المقاومة لفترة أطول. ولكن بحلول أواخر السبعينيات، كانت عبارة ويلر تستخدم وتنتشر من قبل الفيزيائيين في جميع أنحاء العالم، بجميع اللغات، من دون حتى وميض ابتسامة طفولية. كان ذلك في شتاء 1964-1965، عندما اخترع جينزبرج، ودوروش-كيفيتش، ونوفيكوف، وزيلدوفيش، حدسهم غير المنطقي وجمعوا أدلتهم على ذلك. مرة كل ثلاث سنوات، يجتمع خبراء النسبية العامة في مكان ما من العالم لحضور مؤتمر علمي مدته أسبوع واحد لتبادل الأفكار وإظهار نتائج أبحاث بعضهم لبعض. ومن المقرر أن يعقد المؤتمر الرابع من هذا النوع في لندن في شهر يونيو.

لم يسبق لأحد في فريق زيلدوفيش أن سافر خارج حدود الكتلة الشيوعية. من المؤكد أنه لن يُسمح لزيلدوفيش نفسه بالذهاب؛ كان اتصاله بأبحاث الأسلحة حديثًا جدًا. ومع ذلك، كان نوفيكوف أصغر من أن يشارك في مشروع القنبلة الهيدروجينية، وكانت معرفته بالنسبية العامة أفضل من أي شخص في الفريق (ولهذا السبب جندّه زيلدوفيش في الفريق في المقام الأول). أصبح الآن قائد الفريق (بينما زيلدوفيش هو المدرب)، وكانت لغته الإنجليزية مقبولة على الرغم من عدم طلاقته. لقد كان الاختيار المنطقي.

كانت هذه فترة جيدة في العلاقات بين الشرق والغرب. وكانت وفاة ستالين قبل عشرة أعوام سببًا في استئناف تدريجي للمراسلات والزيارات بين العلماء السوفييت

وزملائهم الغربيين (وإن لم تكن المراسلات أو الزيارات مجانية كما كانت في عشرينيات وأوائل ثلاثينيات القرن العشرين قبل أن يهبط الستار الحديدي لستالين). وبطبيعة الحال، فإن الاتحاد السوفييتي سيرسل الآن وفدًا صغيرًا من العلماء إلى كل مؤتمر دولي كبير؛ وهذه الوفود مهمة ليس فقط للحفاظ على قوة العلوم السوفييتية، ولكن أيضًا لإظهار قوة السوفييت للعلماء الغربيين. منذ عهد القياصرة، كان البيروقراطيون الروس يعانون من عقدة النقص في التعامل مع الغرب؛ ومن المهم جدًا بالنسبة إليهم أن يكونوا قادرين على رفع رؤوسهم أمام الرأي العام الغربي وأن يُظهروا بكل فخر ما يمكن أن تفعله أمتهم.

وهكذا، وجد زيلدوفيش، بعد أن رتب دعوة من لندن لنوفيكوف لإلقاء إحدى المحاضرات الرئيسية في مؤتمر النسبية، أن من السهل إقناع البيروقراطيين بضم زميله الشاب إلى الوفد السوفييتي. كان لدى نوفيكوف العديد من الأشياء المثيرة للإعجاب ليبلغ عنها؛ سيخلق انطباعًا إيجابيًا للغاية عن قوة الفيزياء السوفييتية.

وفي لندن، ألقى نوفيكوف محاضرة مدتها ساعة واحدة أمام جمهور ضم ثلاثمائة من أبرز علماء الفيزياء النسبية في العالم. وكانت محاضرته بمثابة جولة من إظهار القوة. لم تكن النتائج المتعلقة بانزياح نجم جبلي بفعل الجاذبية سوى جزء صغير من المحاضرة؛ أما الباقي فكان سلسلة من المساهمات الكبيرة بنفس القدر في فهمنا للجاذبية باستخدام النسبية، والنجوم النيوترونية، والانزياح النجمي، والثقوب السوداء، وطبيعة النجوم الزائفة، والإشعاع بفعل الجاذبية، وأصل الكون. وبينما كنت جالسًا هناك في لندن أستمع إلى نوفيكوف، أذهلني اتساع وقوة البحث الذي أجراه فريق زيلدوفيش. لم يسبق لي أن رأيت أي شيء مثل ذلك من قبل.

بعد محاضرة نوفيكوف، انضمت إلى الحشد المتحمس المحيط به واكتشفت، وهو ما أسعدني كثيرًا، أن لغتي الروسية أفضل قليلًا من لغتي الإنجليزية وأني بحاجة إلى المساعدة في ترجمة المناقشة. ومع تساؤل الحشد، خرجت أنا ونوفيكوف معًا لمواصلة مناقشتنا على انفراد. وهكذا بدأت واحدة من أفضل صداقاتي.

لم يكن من الممكن لي أو لأي شخص آخر أن يستوعب بشكل كامل في لندن تفاصيل تحليل الشعر الذي أجراه فريق زيلدوفيش. وكانت التفاصيل معقدة للغاية. كان علينا أن ننتظر نسخة مكتوبة من العمل، نسخة توضح التفاصيل بعناية.

وصلت النسخة المكتوبة إلى برينستون في سبتمبر 1965 باللغة الروسية. مرة أخرى كنت ممتناً للساعات المملة العديدة التي قضيتها في صف اللغة الروسية عندما كنت طالباً جامعياً. يحتوي التحليل المكتوب على قطعتين. كانت القطعة الأولى، والتي من الواضح أنها من عمل دوروشكيفيتش ونوفيكوف، بمثابة دليل رياضي على أنه عندما يصبح نجم ساكن ذو جبل صغير أكثر انضغاطاً، فإن هناك نتيجتين محتملتين فقط. إما أن يُحدث النجم ثقباً كروياً دقيقاً حول نفسه، أو يُنتج الجبل مثل هذا الانحناء الهائل للزمكان، حيث يقترب النجم من محيطه الحرج، بحيث لا تكون تأثيرات الجبل «اضطراباً صغيراً»؛ ثم تفشل طريقة الحساب وتكون نتيجة الانفجار الداخلي غير معروفة. الجزء الثاني من التحليل كان ما تعلمت تعريفه سريعاً على أنه حجة «زيلدوفيش النموذجية»: إذا كان الجبل صغيراً في البداية، فمن الواضح بديهياً أن الجبل لا يمكنه إحداث انحناء هائل عندما يقترب النجم من محيطه الحرج. وعلينا أن نتجاهل هذا الاحتمال. والاحتمال الآخر يجب أن يكون هو الحقيقة: يجب أن يُحدث النجم ثقباً كروياً بدقة.

ما كان واضحاً بشكل حدسي لزيلدوفيش (والذي سيتبين في النهاية أنه صحيح) كان بعيداً عن الوضوح بالنسبة إلى معظم الفيزيائيين الغربيين. بدأت دوامة الجدل.

إن قوة نتيجة البحث المثير للجدل هائلة. فهو يجذب علماء الفيزياء كما تجذب النزاهات الخلوية النمل. وهكذا كان الأمر مع دليل عدم وجود شعر لفريق زيلدوفيش. جاء الفيزيائيون، مثل النمل، واحداً تلو الآخر في البداية، ولكن بعد ذلك بأعداد كبيرة.

الأول كان فيرنر إسرائيل، الذي وُلد في برلين، ونشأ في جنوب إفريقيا، وتدرّب على قوانين النسبية في أيرلندا، ويكافح الآن لبده مجموعة أبحاث عن النسبية في إدمونتون، كندا. وفي حركة قوية، حسن إسرائيل في البداية دوروشكيفيتش-نوفيكوف، وهو جزء من الدليل السوفييتي: فهو لم يعامل الجبال الصغيرة فقط، كما فعل السوفييت، بل تعامل مع الجبال من أي حجم وشكل. في الحقيقة، عملت حساباته بشكل صحيح مع أي انفجار داخلي، مهما كان غير كروي، حتى لو كان مربعاً، وسمح للانفجار الداخلي بأن يكون ديناميكيّاً، وليس مجرد تسلسل مثالي للنجوم الثابتة. كان الاستنتاج الذي توصل إليه إسرائيل ملحوظاً بنفس القدر، والذي كان مشابهاً لاستنتاج دوروشكيفيتش-نوفيكوف، ولكنه أقوى بكثير: يمكن أن يؤدي الانفجار الداخلي غير الكروي إلى حد كبير إلى نتيجتين فقط: إما ألا ينتج ثقباً أسود على الإطلاق، وإما أن ينتج ثقباً أسود كروياً على وجه التحديد. لكن لكي يكون هذا الاستنتاج صحيحاً، يجب أن يتمتع الجسم المتفجر

بصفتين خاصتين: يجب أن يكون خاليًا تمامًا من أي شحنة كهربائية، ويجب ألا يدور على الإطلاق. وستصبح الأسباب واضحة أدناه.

قدم إسرائيل تحليله ونتائجه لأول مرة في 8 فبراير 1967، في محاضرة في كلية كينجز في لندن. كان عنوان المحاضرة غامضًا بعض الشيء، لكن دينيس سياما في كامبريدج حث طلابه على السفر إلى لندن والاستماع إليها. وكما يتذكر جورج إليس وهو أحد الطلاب: «لقد كانت محاضرة ممتعة للغاية. لقد أثبت إسرائيل نظرية جاءت على حين غرة؛ كان الأمر غير متوقع على الإطلاق؛ لا شيء يشبهها قد حدث من قبل». عندما أنهى إسرائيل محاضرتة، وقف تشارلز ميسنر (طالب سابق في مدرسة ويلر) وطرح تكهنات: ماذا يحدث إذا كان النجم المتفجر يدور ويحمل شحنة كهربائية؟ هل يمكن أن يكون هناك احتمالان مرة أخرى: عدم وجود ثقب على الإطلاق، أو ثقب ذو شكل فريد، يتحدد بالكامل من خلال كتلة النجم المتفجر، ولفه المحوري، وشحنته؟ في نهاية المطاف، سيتبين أن الإجابة هي نعم، ولكن ليس إلا بعد اختبار رؤية زيلدوفيش البدئية.

ولعلك تتذكر أن زيلدوفيش ودوروشكيفيتش ونوفيكوف لم يدرسوا النجوم شديدة التشوه، بل النجوم شبه الكروية ذات الجبال الصغيرة. أثار تحليلهم وادعاءات زيلدوفيش عددًا كبيرًا من الأسئلة:

إذا كان للنجم المتفجر جبل صغير على سطحه، فما هي نتيجة الانفجار الداخلي؟ هل يحدث الجبل انحناءً هائلًا في الزمكان، مع اقتراب النجم من محيطه الحرج (وهي النتيجة التي رفضها حدس زيلدوفيش)، أم أن تأثير الجبل يختفي، تاركًا وراءه ثقبًا أسود كرويًا تمامًا (النتيجة التي فضّلها زيلدوفيش)؟ وإذا تشكل ثقب كروي تمامًا، فكيف يتمكن الثقب من التخلص من تأثير جاذبية الجبل؟ ما الذي يجعل الثقب كرويًا؟

باعتباري أحد طلاب ويلر، فكرت في هذه الأسئلة. ومع ذلك، لم أفكر فيها كتحدٍّ لنفسي، بل كتحدٍّ لطلابي. كنت قد أكملت للتو درجة الدكتوراه في برينستون عام 1968؛ ثم عدت إلى جامعتي في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، في البداية كباحث ما بعد الدكتوراه والآن كأستاذ؛ وبدأت في تكوين حاشية من الطلاب حولي تشبه حاشية ويلر في برينستون.

ريتشارد بريس، شاب ذو لحية خشنة، يبلغ وزنه مائتي رطل، وقوي جسديًا من بروكلين ويحمل حزامًا أسود في الكاراتيه، عمل معي بالفعل في العديد من المشاريع

البحثية الصغيرة، بما في ذلك مشروع يستخدم الأساليب الرياضية اللازمة للإجابة عن هذه الأسئلة. الأسئلة التي تحتاج إلى طرق التقلب. لقد أصبح الآن ناضجًا بما يكفي للتعامل مع مشروع أكثر تحديدًا. بدأ اختبار حدس زيلدوفيش مثاليًا، ولكن لشيء واحد. لقد كان موضوع الساعة وكان آخرون في أماكن أخرى يعانون من ذلك؛ بدأ النمل بمهاجمة أطعمة الرحلة الخلوية بأعداد كبيرة. على بريس أن يتحرك بشكل أسرع.

لم يفعل. وسبقه آخرون في الإجابات. لقد وصل إلى هناك في المركز الثالث، بعد نوفيكونوف وبعد إسرائيل، لكنه وصل إلى هناك بشكل أكثر ثباتًا، وأكثر اكتمالًا، وبرؤية أعمق.

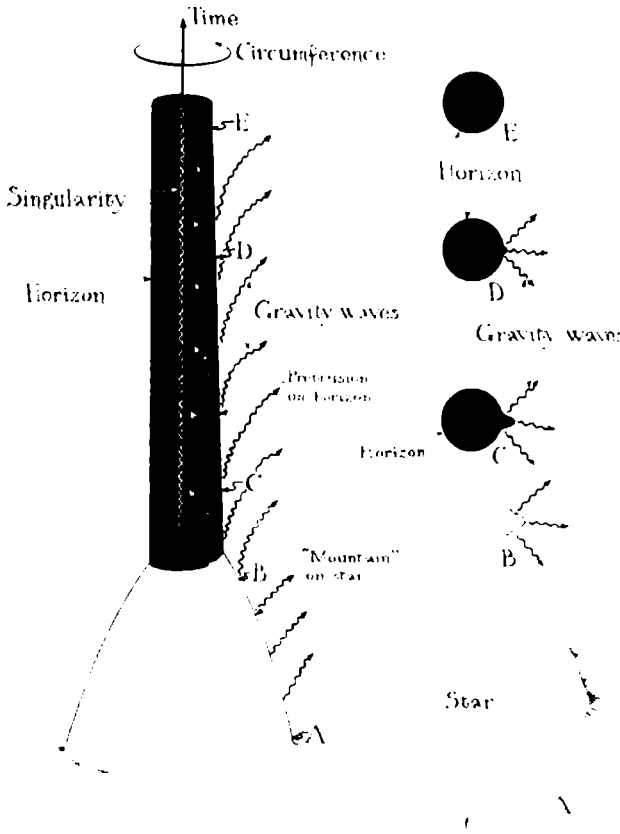
خلدت رؤية بريس على يد جاك سميث، وهو كاتب عمود فكاها في صحيفة لوس أنجلوس تايمز. في عدد 27 أغسطس 1970 من صحيفة التايمز، وصف سميث زيارة قام بها في اليوم السابق إلى معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا قائلاً: «بعد تناول الغداء في نادي أعضاء هيئة التدريس، كنت أتجول بمفردي حول الحرم الجامعي. يمكن أن أشعر بالفكر العميق في الهواء. حتى في الصيف يحرك أشجار الزيتون. نظرت من النافذة. كانت السبورة مغطاة بمعادلات سمكية مثل أوراق الشجر في أثناء المشي، وثلاث جمل باللغة الإنجليزية: نظرية بريس: كل ما يمكن أن يشع سوف يشع، بيانات رصد شوتر: كل ما يشع يمكنه أن يشع، الأشياء يمكن أن تشع إذا وفقط إذا كانت تشع. تابعت طريقي وأنا أتساءل كيف سيؤثر هذا على معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، هذا الخريف، عندما يسمحون للفتيات بالدخول كطالبات جديدات لأول مرة. لا أعتقد أنهم سيُلحقون بالمكان أي ضرر. لديّ حدس بأنهم سيشعون».

هذا الاقتباس يحتاج إلى بعض التوضيح. كانت «بيانات رصد شوتر» سخيفة، لكن نظرية بريس، «كل ما يمكنه أن يشع، سوف يشع»، كانت تأكيدًا جادًا لتكهنات روجر بنروز عام 1969.

وضعت نظرية بريس من خلال الانفجار الداخلي لنجم ذي جبل. ويصور الشكل 7.4 الانهيار الداخلي. النصف الأيسر من هذا الشكل هو مخطط الزمكان من النوع المقدم في الشكل 6.7 من الفصل السادي؛ الجانب الأيمن سلسلة من اللقطات لشكل النجم والأفق مع مرور الزمن، مع الأزمنة الأقدم في الأسفل والأحدث في الأعلى.

عندما يتفجر النجم (اللقطتان السفليتان في الشكل 7.4)، ينمو جبله بشكل أكبر، مما

ينتج عنه تشوه متزايد على شكل جبل في انحناء الزمكان للنجم. بعد ذلك، عندما يغوص النجم داخل محيطه الحرج ويخلق أفق ثقب أسود حول نفسه (اللقطة الوسطى)، فإن انحناء الزمكان المشوه يشوه الأفق، مما يمنحه تنوعاً يشبه الجبل. لكن بروز الأفق لا يمكن أن يعيش طويلاً. الجبل النجمي الذي ولدّه أصبح موجوداً الآن داخل الثقب، لذا لم يعد الأفق قادراً على الشعور بتأثير الجبل. لم يعد الأفق مجبراً على الحفاظ على بروزه الذي سببه الجبل. يقذف الأفق التنوع بالطريقة الوحيدة التي يقدر عليها: فهو يحول التنوع إلى تموجات من انحناء الزمكان (تموجات الجاذبية - الفصل العاشر) التي تنتشر بعيداً في جميع الاتجاهات (اللقطتان العلويتان). تتجه بعض التموجات إلى أسفل الثقب، ويطير البعض الآخر إلى الكون المحيط، وعندما تطير بعيداً، تترك التموجات الثقب بشكل كروي تماماً.



7.4 مخطط الزمكان (يسار) وسلسلة من اللقطات (يمين) توضح الانفجار الداخلي لنجم ذي جبل ليشكل ثقباً أسود.

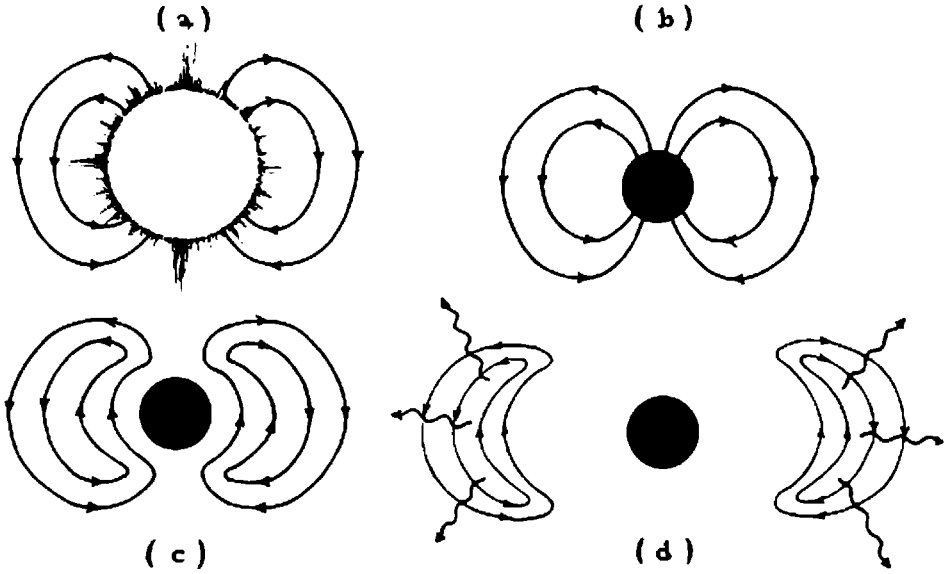
التشبيه المألوف لهذا هو نتف وتر الكمان. وما دامت إصبع المرء تحمل الخيط بشكل مشوه، فإنه يظل مشوهًا؛ وما دام الجبل يبرز من الثقب، فإنه يُبقي الأفق الوليد مشوهًا. عندما يرفع المرء إصبعه عن الخيط، يهتز الوتر، ويرسل موجات صوتية إلى الغرفة؛ تحمل الموجات الصوتية طاقة تشوه الوتر، فيستقر الخيط في شكل مستقيم تمامًا. وبالمثل، عندما يغوص الجبل داخل الثقب، فإنه لن يكون قادرًا على إبقاء الأفق مشوهًا، لذلك يهتز الأفق، ويرسل موجات الجاذبية؛ وتحمل الأمواج طاقة تشوه الأفق، فيستقر الأفق في شكل كروي تمامًا.

كيف يرتبط هذا الانفجار الجبلي بنظرية بريس؟

وفقًا لقوانين الفيزياء، يمكن تحويل نتوء الأفق الشبيه بالجبل إلى إشعاع الجاذبية (تموجات الانحناء). تخبرنا نظرية بريس أن التواء يجب أن يتحول إلى موجات جاذبية، وأن هذا الإشعاع يجب أن يحمل التواء بعيدًا تمامًا. هذه هي الآلية التي تجعل الثقب خاليًا من الشعر.

لا تخبرنا نظرية بريس فقط كيف يفقد الثقب المشوه تشوهه، ولكن أيضًا كيف يفقد الثقب الممغنط مجاله المغناطيسي (الشكل 7.5). (الآلية، في هذه الحالة، كانت واضحة بالفعل قبل نظرية بريس من محاكاة حاسوبية أجراها فيرنر إسرائيل واثان من طلابه الكنديين، فيستي دي لا كروز وتيد شاس).

ينشأ الثقب الممغنط عن طريق انفجار نجم ممغنط. قبل أن يتلغ الأفق النجم المتفجر (الشكل 7.5 a)، يكون المجال المغناطيسي مثبتًا بقوة في داخل النجم؛ التيارات الكهربائية داخل النجم تمنع المجال من الهروب. بعد أن يتلغ الأفق النجم (الشكل 7.5 b)، لن يكون المجال قادرًا على الشعور بالتيارات الكهربائية للنجم؛ لم يعد يثبت. أصبح المجال الآن بمثابة خيوط الأفق، وليس النجم، لكن الأفق أصبح أداة تثبيت لا قيمة لها. تسمح قوانين الفيزياء للمجال بتحويل نفسه إلى إشعاع كهرومغناطيسي (تموجات من القوة المغناطيسية والكهربائية)، وبالتالي تتطلب نظرية بريس أن يفعل ذلك (الشكل 7.5 c). ينتقل الإشعاع الكهرومغناطيسي بعيدًا، جزئيًا أسفل الثقب وجزئيًا بعيدًا عنه، تاركًا الثقب غير ممغنط (الشكل 7.5 d).



7.5 سلسلة من اللقطات تظهر انفجار نجم ممغنط (a) ليشكل ثقبًا أسود (b). يرث الثقب في البداية المجال المغناطيسي من النجم. ومع ذلك، فإن الثقب ليست لديه القدرة على التمسك بالمجال. ينزلق المجال منه (c)، ويتحول إلى إشعاع كهرومغناطيسي وينتقل بعيدًا (d).

إذا أمكن أن تتحول الجبال إلى إشعاع ينطلق بعيدًا وكذلك ينطلق إشعاع المجالات المغناطيسية بعيدًا، فماذا يبقى إذن؟ ما الذي لا يمكن تحويله إلى إشعاع؟ الجواب بسيط: من بين قوانين الفيزياء هناك مجموعة خاصة من القوانين تسمى قوانين الحفظ. وفقًا لقوانين الحفظ هذه، هناك كميات معينة لا يمكن أبدًا أن تتأرجح أو تهتز بطريقة إشعاعية، وبالتالي لا يمكن أبدًا أن تتحول إلى إشعاع ثم تخرج من محيط الثقب الأسود. هذه الكميات المحفوظة هي قوة الجذب الناتجة عن كتلة الثقب، ودوامه الفضاء بسبب دوران الثقب (ناقشناه بالأسفل)، وخطوط المجال الكهربائي التي تشير شعاعيًا؛ أي المجالات الكهربائية التي تشير مباشرة إلى الخارج (ناقشناه بالأسفل) بسبب الشحنة الكهربائية للثقب⁵.

وبالتالي، وفقًا لنظرية بريس، فإن تأثيرات كتلة الثقب ودورانه وشحنته هي الأشياء الوحيدة التي يمكن أن تبقى عندما يختفي كل الإشعاع. ستختفي جميع سمات الثقب الأخرى، وسيحملها الإشعاع بعيدًا. وهذا يعني أنه لا يمكن لأي قياس يمكن إجراؤه

لخصائص الثقب الأخير يمكنها أن تكشف عن أي سمات للنجم الذي انفجر لتكوينه، باستثناء كتلة النجم ودورانه وشحنته. ومن خصائص الثقب لا يمكن للمرء حتى أن يميز (وفقاً لحسابات جيمس رارتل وجاكوب بيكين شتاين، وكلاهما من طلاب ويلر) ما إذا كان النجم الذي شكّل الثقب مصنوعاً من المادة أو المادة المضادة، أو من البروتونات والإلكترونات، أو من النيوتريونات والنيوترينوات المضادة. وبتعبير أكثر دقة، فإن الثقب الأسود ليس له شعر تقريباً؛ «شعره» الوحيد هو كتلته ودورانه وشحنته الكهربائية.

الدليل القاطع والنهائي على أن الثقب الأسود ليس له شعر (باستثناء كتلته ودورانه وشحنته الكهربائية) لم يكن في الواقع دليل بريس. اقتصر تحليل بريس على النجوم المتفجرة التي تكون شبه كروية، والتي تدور ببطء شديد، هذا إن كانت تدور أصلاً. تتطلب أساليب التقلب التي استخدمها هذه التقيدات. لمعرفة المصير النهائي لنجم شديد التشوه، سريع الدوران، ومتفجر، تطلب الأمر مجموعة من التقنيات الرياضية التي تختلف تماماً عن أساليب التقلب.

كان طلاب دينيس سياما في جامعة كامبريدج يتقنون التقنيات المطلوبة، لكن التقنيات كانت صعبة للغاية. لقد استغرق الأمر خمسة عشر عاماً حتى يتمكن طلاب سياما وأحفادهم الفكريون وباستخدام هذه التقنيات من إنتاج دليل قاطع وكامل على أن الثقوب السوداء ليس لها شعر، وأنه حتى لو كان الثقب يدور بسرعة وتشوه بقوة بسبب دورانه، فإن الخصائص النهائية للثقب (بعد أن ينطلق كل الإشعاع بعيداً) يمكن إثباتها بشكل فريد من خلال كتلة الثقب ودورانه وشحنته. يعود نصيب الأسد من الفضل في هذا الدليل إلى اثنين من طلاب سياما، براندون كارتر وستيفن هوكينج، وإلى فيرنر إسرائيل، لكن المساهمات الكبرى جاءت أيضاً من ديفيد روبنسون، وجاري بونتيج، وبافل مازور.

في الفصل الثالث، علقت على الفرق الكبير بين قوانين الفيزياء في كوننا الحقيقي ومجتمع النمل في رواية تي إتش وايت الملحمة «ملك الماضي والمستقبل». كان النمل الأبيض يحكمه شعار «كل ما ليس ممنوعاً، هو إجباري»، لكن قوانين الفيزياء تخالف ذلك الشعار بشكل صارخ. العديد من الأشياء التي يسمح بها القانون الفيزيائي هي غير محتملة إلى حد كبير لدرجة أنها لا تحدث أبداً. تعتبر نظرية بريس استثناء ملحوظاً. إنها واحدة من المواقف القليلة التي واجهتها في الفيزياء حيث يسود شعار النمل: إذا كان القانون الفيزيائي لا يمنع الثقب الأسود من قذف شيء ما على شكل إشعاع، فإن القذف إجباري.

ومن غير المعتاد بنفس القدر الآثار المترتبة على الحالة «عديمة الشعر» الناتجة عن الثقب الأسود. عادةً ما نبني، نحن الفيزيائيون، نماذج نظرية أو حاسوبية مبسطة لمحاولة فهم الكون المعقد حولنا. وللمساعدة في فهم الطقس، يبني فيزيائيو الغلاف الجوي نماذج حاسوبية للغلاف الجوي الذي يدور حول الأرض. وللمساعدة في فهم الزلازل، يبني الجيوفيزيائيون نماذج نظرية بسيطة للصخور المنزقة. وللمساعدة في فهم الانفجار الداخلي للنجوم، بنى أوبنهايمر وسنايدر في عام 1939 نموذجًا نظريًا بسيطًا: سحابة متفجرة من المادة كروية تمامًا، ومتجانسة تمامًا، وخالية تمامًا من الضغط. وبينما نبني، نحن الفيزيائيون، كل هذه النماذج، فإننا ندرك بشدة حدودها. إنها مجرد صور شاحبة للتعقيد السائد «هناك» في الكون «الحقيقي».

لكن الأمر ليس كذلك بالنسبة إلى الثقب الأسود، أو على الأقل ليس كذلك بمجرد أن ينطلق الإشعاع بعيدًا، حاملًا كل «شعر» الثقب. ومن ثم فإن الثقب بسيط للغاية بحيث يمكننا وصفه باستخدام صيغ رياضية دقيقة وبسيطة. نحن لا نحتاج إلى المثالية على الإطلاق. ولا يوجد أي مكان آخر في العالم العياني (أي على مقاييس أكبر من الجسيم دون الذري) يكون بمثل هذا القدر من الصحة والوضوح. ولا يتوقع من أي مكان آخر أن تكون رياضياتنا فيه بهذه الدقة. ولم نتحرر في أي مكان آخر من قيود النماذج المثالية.

لماذا تختلف الثقوب السوداء عن جميع الأجسام الأخرى في الكون العياني؟ لماذا هي، وهي وحدها، بهذه البساطة الأنيقة؟

إذا كنت أعرف الإجابة، فمن المحتمل أن تخبرني الإجابة بشيء عميق جدًا عن طبيعة القوانين الفيزيائية.

لكنني لا أعرف.

ربما سيكتشف الجيل القادم من الفيزيائيين ذلك.

الثقوب السوداء تدور وتنفض

ما خصائص الثقوب الخالية من الشعر، والتي وصفت بشكل مثالي من خلال رياضيات النسبية العامة؟

إذا أمكن تصوير الثقب الأسود على أنه لا يحتوي على أي شحنة كهربائية أو دوران،

فهو على وجه التحديد الثقب الكروي الذي التقينا به في الفصول السابقة.

كيف يمكن وصفه رياضياً؟

عن طريق حل كارل شوارتز-شيلد لعام 1916 لمعادلة أينشتاين للمجال (الفصلان الثالث والسادس).

عندما تسقط شحنة كهربائية في ثقب كهذا، فإن الثقب يكتسب ميزة جديدة واحدة فقط: خطوط المجال الكهربائي، التي تخرج منه بشكل قطري مثل ريشات القنفذ. إذا كانت الشحنة موجبة، فإن خطوط المجال الكهربائي هذه تدفع البروتونات بعيداً عن الثقب وتجذب الإلكترونات؛ وإذا كانت سالبة، فإن خطوط المجال تدفع الإلكترونات بعيداً وتجذب البروتونات. لقد وُصف مثل هذا الثقب المشحون رياضياً بدقة تامة من خلال حل معادلة أينشتاين للمجال التي اكتشفها الفيزيائيان الألماني والهولندي هانز رايسنر في عام 1916 وجونار نوردستروم في عام 1918. ومع ذلك، لم يفهم أحد المعنى الفيزيائي لحل رايسنر ونوردستروم. حتى عام 1960، عندما اكتشف اثنان من طلاب ويلر، جون جريفز وديتر بريل، أنه يصف ثقباً أسود مشحوناً.

7.2 الإطار

منظمة العلوم السوفييتية والغربية، التناقضات والعواقب

بينما كنت أنا وزملائي الفيزيائيون الشباب نكافح من أجل تطوير حدسية الطوق وإثبات أن الثقوب السوداء ليس لها شعر واكتشاف كيف تفقد شعرها، كنا نكتشف أيضاً كيف كان تنظيم الفيزياء في الاتحاد السوفييتي مختلفاً تماماً عما كان عليه في بريطانيا وأمريكا. وما هي الآثار العميقة لهذه الاختلافات. وقد تكون للدروس التي تعلمناها بعض القيمة في التخطيط للمستقبل، خاصة في الاتحاد السوفييتي السابق، حيث تكافح (وقت إصدار الكتاب) جميع مؤسسات الدولة - العلمية والحكومية والاقتصادية - من أجل إعادة تنظيمها على طول الخطوط الغربية. النموذج الغربي ليس مثالياً تماماً، والنظام السوفييتي لم يكن سيئاً تماماً!

في أمريكا وبريطانيا، هناك تدفق مستمر للمواهب الشابة من خلال مجموعة بحثية

مثل ويلر أو سياما. يمكن للطلاب الجامعيين الانضمام إلى المجموعة في عامهم الأخير، ولكنهم يُبعثون بعد ذلك للدراسات العليا. يلتحق بها طلاب الدراسات العليا لمدة ثلاث إلى خمس سنوات، ثم يُرسلون إلى مكان آخر لدراسة ما بعد الدكتوراه. ينضم إليهم باحثو ما بعد الدكتوراه لمدة عامين أو ثلاثة أعوام، ثم يُرسلون إلى مكان جديد ويُتوقع منهم إما إنشاء مجموعة بحثية خاصة بهم في مكان آخر (كما فعلت في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا) وإما الانضمام إلى مجموعة صغيرة تكافح في مكان آخر. ولا يُسمح لأي شخص تقريبًا في بريطانيا أو أمريكا، مهما كان موهوبًا، بالبقاء في عيش معلمه أو معلمها.

على النقيض من ذلك، في الاتحاد السوفيتي، ظل الفيزيائيون الشباب المتميزون (مثل نوفيكوف) عادة في عيش معلمهم لمدة عشرة وعشرين وأحيانًا ثلاثين أو أربعين عامًا. عادة ما كان المرشد السوفيتي العظيم مثل زيلدوفيش أو لاندau يعمل في معهد تابع لأكاديمية العلوم، وليس في إحدى الجامعات، لذلك كان عبء التدريس الخاص به صغيرًا أو غير موجود؛ من خلال الاحتفاظ بأفضل طلابه السابقين، يبنى فريقًا دائمًا من الباحثين المتفرغين حول ذاته، والذي يصبح متماسكًا وقويًا للغاية، والذي قد يبقى معه حتى نهاية حياته المهنية. مكتبة سر من قرأ

أرجع بعض أصدقائي السوفيت هذا الاختلاف إلى إخفاقات النظام البريطاني / الأمريكي: فجميع علماء الفيزياء البريطانيين أو الأمريكيين العظماء تقريبًا يعملون في الجامعات، حيث غالبًا ما تكون الأبحاث خاضعة للتدريس وحيث لا يوجد عدد كافٍ من الوظائف الدائمة المتاحة للسماح ببناء مجموعة قوية ودائمة من الباحثين. ونتيجة لذلك، لم تكن هناك مجموعات بحثية في الفيزياء النظرية في بريطانيا أو أمريكا يمكنها التظاهر بأنها مساوية لمجموعة لاندau في الثلاثينيات حتى الخمسينيات، أو مجموعة زيلدوفيش في الستينيات والسبعينيات. وبهذا المعنى، لم يكن لدى الغرب أي أمل في التنافس مع الاتحاد السوفيتي.

أرجع بعض أصدقائي الأمريكيين هذا الاختلاف إلى إخفاقات النظام السوفيتي: كان من الصعب جدًا، لوجستيًا، الانتقال من معهد إلى معهد ومن مدينة إلى أخرى في الاتحاد السوفيتي، لذلك اضطر الفيزيائيون الشباب إلى البقاء مع معلمهم؛ ولم تتح لهم الفرصة للخروج وتكوين مجموعات مستقلة خاصة بهم. وأكد النقاد أن النتيجة كانت نظامًا إقطاعيًا. كان المرشد مثل اللورد وفريقه مثل الأفتان، حيث يعيشون في السخرة معظم حياتهم المهنية. كان اللورد والأفتان مترابطين بطريقة معقدة، ولكن لم يكن هناك شك

في من هو الرئيس. إذا كان اللورد حرفياً ماهراً مثل زيلدوفيش أو لاندوا، فمن الممكن أن يكون فريق اللورد/ الفن منتجاً بشكل غني. إذا كان السيد سلطوياً وليس متميزاً (كما كانت الحال عادة)، فقد تكون النتيجة مأساوية: إهدار المواهب البشرية وحياة بائسة للأقنان.

في النظام السوفييتي، أنتج كل معلم عظيم مثل زيلدوفيش فريقاً بحثياً واحداً فقط، وإن كان فريقاً قوياً للغاية، ولا مثيل له في أي مكان في الغرب. وعلى النقيض من ذلك، فإن المرشدين الأمريكيين أو البريطانيين العظماء، مثل ويلر وسياما، ينتجون العديد من المجموعات البحثية الأصغر والأضعف، المنتشرة في جميع أنحاء البلاد، ولكن هذه المجموعات يمكن أن يكون لها تأثير تراكمي كبير على الفيزياء. يتمتع المرشدون الأمريكيون والبريطانيون بتدفق مستمر من الشباب الجدد للمساعدة في الحفاظ على عقولهم وأفكارهم متجددة. في تلك الحالات النادرة التي أراد فيها المرشدون السوفييت البدء من جديد، كان عليهم قطع علاقاتهم مع فريقهم القديم بطريقة قد تكون مؤلمة للغاية.

في الواقع، كان هذا مقدراً أن يحدث لزيلدوفيش: فقد بدأ في بناء فريقه للفيزياء الفلكية في عام 1961؛ وبحلول عام 1964، كان متفوقاً على أي فريق آخر في مجال الفيزياء الفلكية النظرية في أي مكان في العالم؛ ثم في عام 1978، بعد وقت قصير من انتهاء العصر الذهبي، حدث انقسام صادم ومتفجر، حيث ذهب كل فرد تقريباً في فريق زيلدوفيش في اتجاه واحد وذهب هو في اتجاه آخر، متألماً نفسياً ولكن متحرراً من الأعباء، وحرراً للبدء في البناء من جديد. ومن المؤسف أن إعادة بنائه لن تكون ناجحة. لن يحيط نفسه مرة أخرى بفريق موهوب وقوي مثل الفريق الذي قاده بمساعدة نوفيكونوف. لكن نوفيكونوف، الذي أصبح الآن باحثاً مستقلاً، برز في الثمانينيات كقائد موهوب لفريق أعيد بناؤه.

يمكننا تصوير انحناء الفضاء حول ثقب أسود مشحون، وخطوط المجال الكهربائي للثقب، باستخدام مخطط التضمين (النصف الأيسر من الشكل 7.6). هذا المخطط هو في الأساس نفس المخطط الموجود في الجزء السفلي الأيمن من الشكل 3.4، ولكن مع إزالة النجم (الجزء الأسود من الشكل 3.4) لأن النجم موجود داخل الثقب الأسود وبالتالي لم يعد لديه اتصال بالكون الخارجي. وبصورة أكثر دقة، يصور هذا الشكل «المستوى» عند خط الاستواء -وهو قطعة ثنائية الأبعاد من مكان الثقب- خارج الثقب

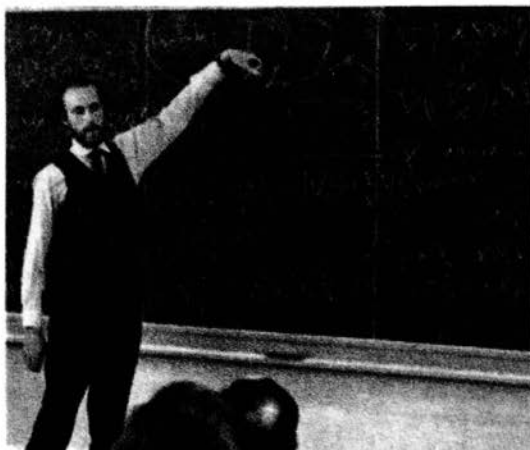
الأسود، مدمجًا في مساحة مفرطة مسطحة ثلاثية الأبعاد. (للاطلاع على مناقشة معنى هذه الأشكال، انظر الشكل 3.3 والنص المصاحب). لقد قطع «المستوى» الاستوائي عند أفق الثقب، لذلك نرى فقط الجزء الخارجي من الثقب، وليس الجزء الداخلي منه. الأفق، الذي هو في الواقع سطح كرة، يبدو كدائرة في الرسم التخطيطي لأننا نرى خط الاستواء فقط. يوضح الشكل خطوط المجال الكهربائي للثقب وهي بارزة بشكل قطري خارج الأفق. إذا نظرنا إلى الأسفل على الشكل من الأعلى (الجانب الأيمن من الشكل 7.6)، فإننا لا نرى انحناء المكان، ولكننا نرى خطوط المجال الكهربائي بشكل أكثر وضوحًا.



7.6 خطوط المجال الكهربائي الخارجة من أفق ثقب أسود مشحون كهربائيًا. اليسار: تضمين الرسم البياني. على اليمين: منظر لمخطط التضمين من الأعلى.

لم تكن تأثيرات اللف المحوري على الثقب الأسود مفهومة حتى أواخر الستينيات. جاء الفهم إلى حد كبير من براندون كارتر، أحد طلاب دينيس سياما في جامعة كامبريدج. عندما انضم كارتر إلى مجموعة سياما في خريف عام 1964، اقترح سياما على الفور كأول مشكلة بحثية له، دراسة الانفجار الداخلي للنجوم الواقعية الدوارة. وأوضح سياما أن جميع الحسابات السابقة للانفجار الداخلي تعاملت مع نجوم مثالية لا تلف محوريًا، لكن يبدو أن الوقت والأدوات الآن مناسبة لدراسة تأثيرات اللف. كان عالم رياضيات نيوزيلندي يدعى روي كير قد نشر للتو ورقة بحثية تقدم حلاً لمعادلة أينشتاين للمجال والتي يبدو أنها تصف انحناء الزمكان خارج النجم الدوار. كان هذا هو الحل الأول للنجم الدوار الذي وجدته أي شخص على الإطلاق. ولسوء الحظ، أوضح سياما أنه كان

حلاً خاصاً جداً؛ ومن المؤكد أنه لا يمكن وصف جميع النجوم الدوارة. تحتوي النجوم الدوارة على الكثير من «الشعر» (الكثير من الخصائص مثل الأشكال المعقدة والحركات الداخلية المعقدة لغازاتها)، ولم يكن حل كبير يحتوي على الكثير من «الشعر» على الإطلاق: كانت أشكال انحناء الزمكان سلسلة للغاية وبسيطة للغاية؛ بسيطة جداً بحيث لا تتوافق مع النجوم الدوارة النموذجية. ومع ذلك، كان حل كبير لمعادلة أينشتاين للمجال بمثابة نقطة انطلاق.

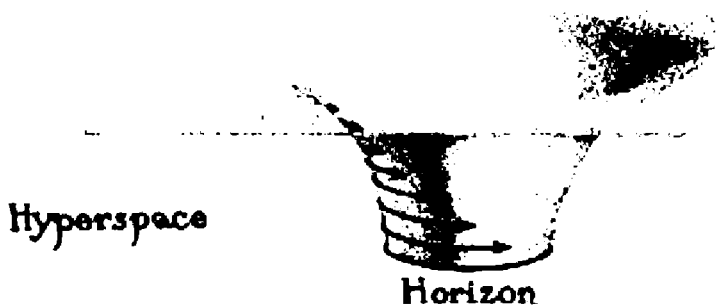


اليسار: روي كير كاليفورنيا. 1975. على اليمين: براندون كارتر يلقي محاضرة حول الثقوب السوداء في مدرسة صيفية في جبال الألب الفرنسية في يونيو 1972. [على اليسار: بإذن من روي كير؛ على اليمين: صورة كيب ثورن].

القليل من المشكلات البحثية لها نتائج فورية مثل تلك التي حققتها هذه المشكلة: ففي غضون عام، أظهر كارتر رياضياً أن حل كبير لا يصف نجماً دواراً، بل ثقباً أسود دواراً. (حقق هذا الاكتشاف أيضاً، بشكل مستقل، روجر بنروز في لندن، وروبرت بوير في ليفربول وريتشارد ليندكفايست، وهو طالب سابق لدى ويلر كان يعمل في جامعة فينسلاند في ميدلتاون، كونيكتيكت). وبحلول منتصف السبعينيات، مضى كارتر وآخرون، ليسينا أن حل كبير لا يصف فقط نوعاً خاصاً واحداً من الثقوب السوداء الدوارة، بل يصف كل ثقب أسود دوار يمكن أن يوجد في الطبيعة.

تتجسد الخصائص الفيزيائية للثقب الأسود الدوار في رياضيات الحل الذي قدمه كير، واكتشف كارتر عبر سبر أغوار تلك الرياضيات ما ينبغي أن تكون عليه تلك الخصائص.

واحدة من أكثر هذه الأشياء إثارة للاهتمام هي الدوامة التي تشبه الإعصار والتي يخلقها الثقب في الفضاء المحيط به.



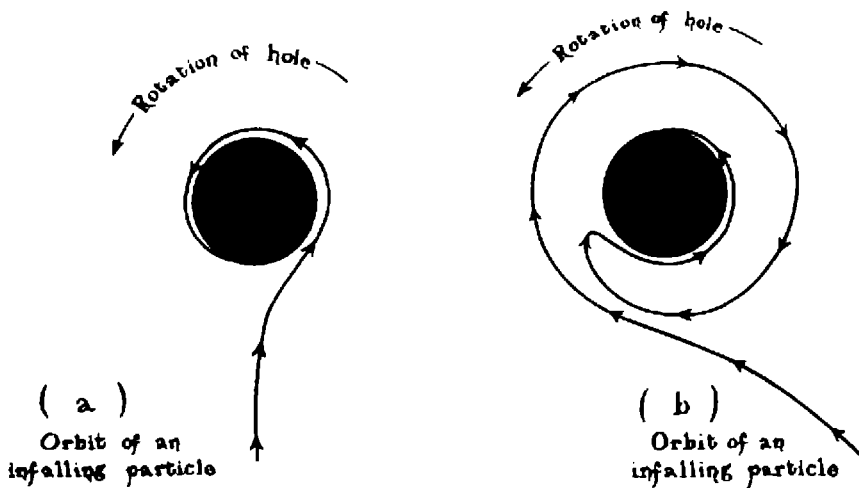
7.7 مخطط التضمين الذي يُظهر «دوامة تشبه الإعصار» للمكان ناتجة عن دوران ثقب أسود.

توضح هذه الدوامة في مخطط التضمين في الشكل 7.7 السطح على شكل قرن البوق الذي هو الصحيفة الاستوائية للثقب (قطعة ثنائية الأبعاد من فضاء الثقب)، كما هو مدمج في مساحة زائدة مسطحة ثلاثية الأبعاد. يستحوذ دوران الثقب على المكان المحيط به (سطح قرن البوق) ويجبره على الدوران بطريقة تشبه الإعصار، بسرعات تتناسب مع أطوال الأسهم في الشكل. بعيداً عن قلب الإعصار، يدور الهواء ببطء، وبالمثل، بعيداً عن أفق الثقب، يدور المكان ببطء. بالقرب من قلب الإعصار، يدور الهواء بسرعة، وبالمثل، يدور المكان بالقرب من الأفق بسرعة. عند الأفق، ينغلق المكان بإحكام في الأفق: فهو يدور بنفس معدل اللف المحوري للأفق.

ولهذه الدوامة الفضائية تأثير لا يرحم على حركات الجزيئات التي تسقط في الثقب. ويبين الشكل 7.8 مسارات اثنين من هذه الجسيمات، كما يعرضها عبر الإطار المرجعي لمراقب خارجي ثابت - أي في إطار مراقب لا يسقط عبر الأفق ويدخل في الثقب.

يسقط الجسيم الأول (الشكل 7.8 a) برفق في الثقب. إذا لم يكن الثقب يدور، فإن هذا الجسيم، مثل سطح النجم المتفجر، سيتحرك بشكل قطري إلى الداخل بشكل أسرع وأسرع في البداية، ولكن بعد ذلك، كما يلاحظ المراقب الخارجي الثابت، فإنه سيبطئ سقوطه ويتجمد في الأفق. (تذكر «النجوم المتجمدة» في الفصل السادس).

يغير دوران الثقب هذا بطريقة بسيطة للغاية: الدوران يجعل الفضاء يدور، ودوامة الفضاء تجعل الجسيم، عندما يقترب من الأفق، يدور بتناغم مع الأفق بحد ذاته. وبذلك يصبح الجسيم متجمدًا في الأفق الدوار، وكما يراه المراقب الخارجي الثابت، فإنه يدور حول الأفق ويدور معه إلى الأبد. (وبالمثل، عندما يتفجر نجم دوار ليشكل ثقبًا دوارًا، كما يراه مراقب خارجي ثابت، فإن سطح النجم «يتجمد» في الأفق الدوار، ويدور حوله ويدور معه إلى الأبد).



7.8 المسارات في الفضاء لجسيمين يقذفان نحو الثقب الأسود. (المسارات هي تلك التي يمكن قياسها في إطار مرجعي خارجي ثابت). وعلى الرغم من حركتهما الأولية المختلفة تمامًا، تسحب كلا الجسيمين، دوامة الفضاء، إلى نفس الدوران المتزامن مع الثقب عندما يقتربان من الأفق.

على الرغم من أن المراقبين الخارجيين يرون الجسيم الموجود في الشكل 7.8 a يتجمد في الأفق الدوار ويبقى هناك إلى الأبد، فإن الجسيم نفسه يرى شيئًا مختلفًا تمامًا. ومع اقتراب الجسيم من الأفق، فإن تمدد الزمن بفعل الجاذبية يجبر زمن الجسيم على التدفق ببطء أكثر فأكثر، مقارنة بزمن الإطار المرجعي الخارجي الثابت. عندما يمر مقدار لا نهائي من الزمن الخارجي، فإن الجسيم يمر فقط بكمية محدودة وصغيرة جدًا من الزمن. وفي ذلك الزمن المحدود، يصل الجسيم إلى أفق الثقب، وفي اللحظات القليلة التالية من زمنه، يفوق مباشرة عبر الأفق ويهبط نحو مركز الثقب. هذا الفرق الهائل بين سقوط الجسيم كما يراه الجسيم وكما يراه المراقبون الخارجيون مماثل تمامًا للفرق بين الانفجار

النجمي كما يُرى على سطح النجم (الانخفاض السريع عبر الأفق) وكما يراه المراقبون الخارجيون (تجمد الانفجار الداخلي للنجوم، الجزء الأخير من الفصل السادس).

يُلقى الجسيم الثاني (الشكل 7.8 b) نحو الثقب على مسار دوامي يدور بشكل معاكس لاتجاه دوران الثقب. ومع ذلك، عندما يقترب الجسيم أكثر فأكثر من الأفق، فإن دوامة الفضاء تمسك به وتعكس حركته الدورانية. وكما هي الحال مع الجسيم الأول، فإنه مجبر على الدوران بشكل ثابت مع الأفق، كما يراه المراقبون الخارجيون.

إلى جانب خلق دوامة في الفضاء، فإن دوران الثقب الأسود يشوه أيضًا أفق الثقب، بنفس الطريقة التي يشوه بها دوران الأرض سطح الأرض. تدفع قوى الطرد المركزي خط استواء الأرض الذي يدور إلى الخارج مسافة 22 كيلومترًا بالنسبة إلى قطبيه. وبالمثل، فإن قوى الطرد المركزي تجعل أفق الثقب الأسود يبرز عند خط الاستواء بالطريقة الموضحة في الشكل 7.9. إذا لم يُدر الثقب، فإن أفقه يكون كرويًا (النصف الأيسر من الشكل). إذا دار الثقب بسرعة، فإن أفقه ينتفخ بقوة (النصف الأيمن من الشكل).

إذا كان الثقب يدور بسرعة كبيرة جدًا، فإن قوى الطرد المركزي سوف تمزق أفقه تمامًا مثلما يقذف الماء من الدلو عندما يدور الدلو بسرعة كبيرة. وبالتالي، هناك حد أقصى لمعدل الدوران الذي يمكن للثقب البقاء عنده. ويدور الثقب الموجود في النصف الأيمن من الشكل 7.9 بنسبة 58 بالمائة من هذا الحد الأقصى.

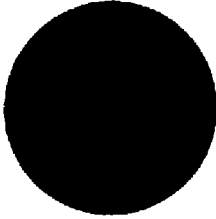
هل من الممكن تدوير الثقب إلى أعلى من الحد الأقصى المسموح به، وبالتالي تدمير الأفق وإلقاء نظرة خاطفة على ما بداخله؟

للأسف لا.

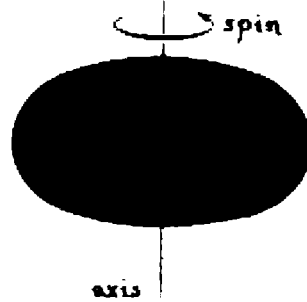
في عام 1986، بعد عقد من العصر الذهبي، أظهر فيرنر إسرائيل أنه إذا حاول المرء جعل الثقب يدور بسرعة أكبر من الحد الأقصى بأي طريقة على الإطلاق، فسوف يفشل دائمًا. على سبيل المثال، إذا حاول أحدهم تسريع ثقب يدور إلى الحد الأقصى عن طريق رمي مادة سريعة الدوران فيه، فإن قوى الطرد المركزي ستمنع المادة سريعة الدوران من الوصول إلى الأفق ودخول الثقب. والأهم من ذلك، هو أن أي تفاعل عشوائي صغير بين ثقب يدور إلى أقصى حد مع الكون المحيط به (على سبيل المثال، قوة الجاذبية للنجوم البعيدة) ربما يعمل على إبطاء الدوران قليلًا. يبدو أن قوانين الفيزياء لا تريد السماح لأي

شخص خارج الثقب بإلقاء نظرة خاطفة على باطنه واكتشاف أسرار الجاذبية الكمومية المحبوسة في المفردة المركزية للثقب (الفصل الثالث عشر).

Horizon of a non-spinning black hole



Horizon of a rapidly spinning black hole



7.9 شكل الأفق لثقبين أسودين، أحدهما (يسار) لا يدور، والآخر (يمين) يدور بمعدل لف محوري بنسبة 58 بالمائة من الحد الأقصى. لقد اكتشف تأثير اللف المحوري على شكل الأفق في عام 1973 لاري سمار، وهو طالب في جامعة ستانفورد استوحى أفكاره من ويلر.

بالنسبة إلى ثقب له كتلة الشمس، فإن الحد الأقصى لمعدل الدوران هو دورة واحدة كل 0.000062 ثانية (62 ميكروثانية). وبما أن محيط الثقب يبلغ نحو 18.5 كيلومتر، فإن هذا يتوافق مع سرعة دوران تبلغ نحو (18.5 كيلومتر) / (0.000062 ثانية)، وهي تعادل سرعة الضوء تقريباً، 299.792 كيلومتراً في الثانية (ليست صدفة تماماً!). الثقب الذي تبلغ كتلته مليون شمس، له محيط أكبر بمليون مرة من ثقب كتلته مثل كتلة شمسية، لذا فإن معدل دورانه الأقصى (المعدل الذي يجعله يدور بسرعة الضوء تقريباً) أصغر بمليون مرة، دورة كل 62 ثانية.

في عام 1969، اكتشف روجر بنروز (الذي ستتعلم عنه الكثير في الفصل الثالث عشر) اكتشافاً رائعاً. ومن خلال التلاعب بمعادلات حل كير لمعادلة أينشتاين للمجال، اكتشف أن الثقب الأسود الذي يدور يخزن طاقة دورانية في دوامة الفضاء حول نفسه، ولأن طاقة الدوامة تقع خارج أفق الثقب وليس داخله، فمن الممكن فعلاً أن تُستخرج هذه الطاقة ثم تُستخدم لتشغيل الأشياء. كان اكتشاف بنروز رائعاً، لأن الطاقة الدورانية للثقب هائلة (كما أظهر ديمتريوس كريستودولو لاحقاً). وإذا دار الثقب بأقصى معدل ممكن، فإن كفاءته في تخزين وإطلاق الطاقة تكون أعلى بـ 48 مرة من كفاءة كل الوقود النووي

الموجود في الشمس. إذا حُرقت كل وقودها النووي (في الواقع، لن تحرقه بالكامل)، فلن تتمكن الشمس إلا من تحويل جزء قدره 0.006 من كتلتها إلى حرارة وضوء. إذا أردنا استخراج كل الطاقة الدورانية لثقب سريع الدوران (وبالتالي إيقاف لفه المحوري)، فسوف نحصل على $0.006 \times 48 = 29\%$ من كتلة الثقب كطاقة قابلة للاستخدام.

ومن المثير للدهشة أن الفيزيائيين اضطروا إلى البحث لمدة سبع سنوات قبل أن يكتشفوا طريقة عملية يمكن من خلالها للطبيعة أن تستخرج طاقة دوران الثقب وتستخدمها. قاد بحثهم الفيزيائيين إلى اتباع طريقة مجنونة تلو الأخرى، وكلها ستنتج من حيث المبدأ، لكن لم يُظهر أي منها الكثير من الوعد العملي، قبل أن يكتشفوا أخيراً ذكاء الطبيعة. سأصف في الفصل التاسع هذا البحث والاكتشاف، ونتائجه: «آلة» للثقب الأسود لتشغيل النجوم الزائفة والنفاثات العملاقة.

إذن، كما رأينا، تنتج الشحنة الكهربائية خطوط مجال كهربائي تبرز بشكل قطري خارج أفق الثقب، وينتج الدوران دوامة في الفضاء حول الثقب، ثم، تشويهاً لشكل الأفق، وتخزيناً للطاقة، ماذا يحدث لثقب لديه كل من الشحنة واللف المحوري؟ لسوء الحظ، الإجابة ليست مثيرة للاهتمام بالمرة؛ أنه يحتوي على القليل من الأفكار الجديدة. تنتج شحنة الثقب الأسود خطوط المجال الكهربائي المعتادة. إن اللف المحوري للثقب يخلق الدوامة المعتادة للمكان حول الثقب، ويخزن طاقة اللف المحوري المعتادة، ويجعل خط استواء الأفق ينتفخ بالطريقة المعتادة.

الأشياء الوحيدة الجديدة هي عدد قليل من خطوط المجال المغناطيسي غير المثيرة للاهتمام، والتي أنشأتها دوامة الفضاء في أثناء تدفقها عبر المجال الكهربائي. (خطوط المجال هذه ليست شكلاً جديداً من «شعر» الثقب؛ فهي مجرد مظهر من مظاهر تفاعل الأشكال القياسية القديمة من الشعر: تفاعل الدوامة بالحث بسبب اللف المحوري مع الشحنة المستحثة من المجال الكهربائي). تتجسد جميع خصائص الثقب الأسود المشحون الذي يلف حول محوره في حل أنيق لمعادلة مجال أينشتاين التي اشتقها تيد نيومان عام 1965 في جامعة بيتسبرج ومجموعة من طلابه: يوجين كوتش، وك. تشينابايريد، وألبرت إكستون، وأ. براكاش، وروبرت تورنس.

لا تستطيع الثقوب السوداء أن تلف حول محورها فحسب، بل يمكنها أن تنبض

أيضاً. ومع ذلك، لم يُكتشف نبضها رياضياً إلا بعد مرور ما يقرب من عقد من الزمن على اكتشاف لفها المحوري. لقد أعيق الاكتشاف بسبب انغلاق عقلي عنيف.

لمدة ثلاث سنوات (1969-1971)، «شاهد» نسل جون ويلر الثقوب السوداء وهي تنبض، ولم يفهموا ما يرونه. كان هذا النسل هو ريتشارد بريس (تلميذي، وبالتالي حفيد ويلر الفكري)، وس. ف. فيشفشوارا وليستر إدلشتاين (طلاب تشارلز ميسنر في جامعة ماريلاند، وبالتالي أيضاً أحفاد ويلر الفكريون)، وفرانك زيريلي (طالب ويلر نفسه في برينستون).

شاهد فيشفشوارا وإدلشتاين وريس وزيريلي الثقوب السوداء تنبض في عمليات المحاكاة الحاسوبية وفي الحسابات بالقلم الرصاص والورق. ما اعتقدوا أنهم رأوه كان إشعاع الجاذبية (تموجات من انحناء الزمكان) يرتد بالقرب من الثقب، محصوراً هناك بسبب انحناء الزمكان الخاص بالثقب. لم يكن الارتداد كاملاً. سوف تتسرب التموجات تدريجياً من محيط الثقب وتطير بعيداً. كان هذا لطيفاً نوعاً ما، لكنه لم يكن مثيراً للاهتمام بشكل كبير.

في خريف عام 1971، أدرك بيل بريس، وهو طالب دراسات عليا جديد في مجموعتي، أن تموجات انحناء الزمكان التي ترتد بالقرب من الثقب يمكن اعتبارها نبضات للثقب الأسود نفسه. ففي النهاية، كما يُرى من خارج الأفق، لا يتكون الثقب إلا من انحناء الزمكان. وبالتالي فإن تموجات الانحناء لم تكن أكثر ولا أقل من نبضات انحناء الثقب، وبالتالي نبضات الثقب نفسه.

وكان لهذا التغيير في وجهة النظر تأثير كبير. إذا اعتقدنا أن الثقوب السوداء قادرة على النبض، فمن الطبيعي أن نتساءل عما إذا كان هناك أي تشابه بين نبضاتها ونبضات («رنين») الجرس، أو نبضات النجم. قبل رؤية بريس، لم تكن مثل هذه الأسئلة مطروحة. وبعد ذلك، أصبحت مثل هذه الأسئلة واضحة.

الجرس والنجم لهما ترددات طبيعية ينبضان بها. (الترددات الطبيعية للجرس تنتج نغمة رنينه النقية).

هل هناك ترددات طبيعية مماثلة يحب الثقب الأسود أن ينبض بها؟

نعم، اكتشف بريس ذلك باستخدام المحاكاة الحاسوبية. دفع هذا الاكتشاف تشاندراسخار، بالتعاون مع ستيفن ديتويلر (أحد أحفاد ويلر الفكريين)، إلى الشروع في مشروع لفهرسة جميع ترددات النبض الطبيعي للثقب الأسود. وسنعود إلى تلك الترددات - تشبه نغمات الجرس بالنسبة إلى الثقب الأسود - في الفصل العاشر.

عندما تكون عجلة السيارة التي تدور بسرعة خارج المحاذاة قليلاً، يمكن أن تبدأ في الاهتزاز، ويمكن أن تبدأ اهتزازاتها في استخلاص الطاقة من الدوران واستخدام تلك الطاقة لتصبح أقوى وأقوى. في الواقع، يمكن أن تنمو الاهتزازات بقوة كبيرة، لدرجة أنها في الحالات القصوى يمكن أن تؤدي إلى تمزيق عجلة السيارة.

يصف الفيزيائيون ذلك بعبارة «اهتزازات العجلة غير المستقرة». كان بيل بريس على علم بهذا وبالسلوك المماثل للنجوم الدوارة، لذا كان من الطبيعي أن يتساءل، عندما اكتشف أن الثقوب السوداء يمكن أن تنبض: «إذا كان الثقب الأسود يلف بسرعة، فهل ستكون نبضاته غير مستقرة؟ هل يمكن للنبضات استخراج الطاقة من اللف المحوري للثقب وأن تستخدم تلك الطاقة لتصبح أقوى وأقوى، وهل يمكن أن تنمو النبضات بقوة كبيرة لدرجة أن تمزق الثقب؟»، كان اعتقاد تشاندراسخار (الذي لم يكن منغمساً بعد في أبحاث الثقوب السوداء) هو نعم. وكان اعتقادي الشخصي هو لا. في نوفمبر 1971، راهناً.

الأدوات لم تكن موجودة بعد لحل الرهان. ما أنواع الأدوات اللازمة؟ بما أن النبضات ستبدأ ضعيفة ثم تزداد بقوة تدريجياً (إذا نمت على الإطلاق)، يمكن اعتبارها «تقلبات» صغيرة في انحناء الزمكان للثقب -تماماً كما تمثل اهتزازات كأس النبيذ تقلبات رنين صغيرة في شكل الزجاج. وهذا يعني أنه يمكن تحليل نبضات الثقب باستخدام طرق التقلب التي وُصفت في الإطار 7.1 أعلاه. ومع ذلك، فإن أساليب التقلب المحددة التي استخدمها بريس وبريس وفيشفشوارا وتشاندراسخار وآخرون في خريف عام 1971 لن تنجح إلا في تقلبات الثقوب السوداء غير الدوارة، أو التي تدور ببطء شديد. ما كانوا بحاجة إليه هو أساليب جديدة تماماً لإحداث التقلبات؛ أي أساليب لإحداث تقلبات في الثقوب سريعة الدوران.

أصبحت الجهود المبذولة لابتكار مثل هذه الأساليب المزعجة موضوعاً ساخناً في عامي 1971 و 1972. وقد عمل عليها طلابي، وطلاب ميسنر، وطلاب ويلر، وتشاندراسخار مع تلميذه جون فريدمان، كما فعل آخرون. وكانت المنافسة شديدة. وكان الفائز هو شاول نيوكولسكي، أحد طلابي من جنوب إفريقيا.

يتذكر نيوكولسكي بوضوح المشهد الذي وضع معادلات طريقته في مكانها الصحيح. ويقول: «في بعض الأحيان، عندما تلعب بالرياضيات، يبدأ عقلك في انتقاء الأنماط». «كنت جالساً على طاولة المطبخ في شقتنا في باسادينا في إحدى الأمسيات من شهر مايو

عام 1972، ألعب بالرياضيات؛ وكانت زوجتي روز تصنع الكريب في مقلاة تيفلون، والتي كان من المفترض ألا تلتصق. استمر نسيج الكريب في الالتصاق. في كل مرة كانت تسكب فيها الخليط كانت تضرب المقلاة على سطح الطاولة. كانت تشتم وتضرب، وكنت أصرخ عليها لكي تصمت لأنني كنت منشغلاً بالرياضيات؛ بدأت المصطلحات الرياضية تلغي بعضها بعضاً في صيغي. لقد ألغيت كل شيء! وكانت المعادلات في مكانها الصحيح! وبينما كنت جالساً أحرق إلى معادلاتي البسيطة المذهلة، ملأني هذا الشعور بمدى غبائي؛ كان بإمكانني أن أفعل ذلك قبلها بستة أشهر؛ كل ما كان عليّ فعله هو جمع الحدود (من المعادلة الرياضية) الصحيحة معاً.



حفلة في منزل ماما كوفاكس في مدينة نيويورك، ديسمبر 1972. من اليسار إلى اليمين: كيب ثورن، مارجريت بريس، بيل بريس، روزلين تيوكولسكي، شاول تيوكولسكي.
[بإذن من ساندورج. كوفاكس.]

باستخدام معادلات تيوكولسكي، يمكن للمرء تحليل جميع أنواع المشكلات: الترددات الطبيعية لنبضات الثقب الأسود، واستقرار نبضات الثقب، وإشعاع الجاذبية الناتج عندما يتلعب ثقب أسود نجمًا نيوترونيًا، والكثير غير ذلك. مثل هذه التحليلات،

والتوسعات في أساليب تيوكولسكي، أجراها على الفور جيش صغير من الباحثين: أليكسي ستارووينسكي (طالب عند زيلدوفيش)، بوب والد (طالب عند ويلر)، جيف كوهين (طالب عند ديتير بريل، الذي كان طالباً عند ويلر)، وغيرهم الكثير. كان تيوكولسكي نفسه، مع بيل بريس، مسؤولين عن المشكلة الأكثر أهمية: استقرار نبضات الثقب الأسود.

كان استنتاجهما، المستمد من مزيج من الحسابات الحاسوبية والحسابات باستخدام الصيغ الرياضية، مخيباً للآمال: بصرف النظر عن مدى سرعة دوران الثقب الأسود، فإن نبضاته مستقرة⁶. تستخرج نبضات الثقب طاقة اللف المحوري من الثقب، ولكنها تشع الطاقة أيضاً بعيداً. مثل موجات الجاذبية. والمعدل الذي تشع به الطاقة دائماً أكبر من المعدل الذي تستخرجه به من اللف المحوري للثقب. وبالتالي فإن طاقة النبضات للثقوب تموت دائماً. إنها لا تنمو أبداً، وبالتالي لا يمكن تدمير الثقوب بسبب نبضاتها.

تشاندراسخار، غير راضٍ عن هذا الاستنتاج الذي توصل إليه بريس وتيوكولسكي بسبب اعتماده الحاسم على حسابات الحاسوب، رفض التنازل عن رهاننا. فقط عندما يكون من الممكن إجراء البرهان بالكامل مباشرةً باستخدام الصيغ الرياضية، سيكون مقتنعاً تماماً. وبعد مرور خمسة عشر عامًا، قدم برنارد وايتنج، وهو باحث سابق في مرحلة ما بعد الدكتوراه لهوكينج (وبالتالي الحفيد الفكري لسياما)، مثل هذا الدليل، ورفضه تشاندراسخار⁷.

تشاندراسخار هو أكثر من يسعى للكمال، أكثر مني شخصياً. هو وزيلدوفيش يقعان على طرفي نقيض من طيف الكمال. لذلك، في عام 1975، عندما أعلن شباب العصر الذهبي انتهاء العصر الذهبي وخرجوا من أبحاث الثقوب السوداء بشكل جماعي، انزعج تشاندراسخار. كان هؤلاء الشباب قد حملوا أساليب تيوكولسكي للتغلب على مسافة كافية لإثبات أن الثقوب السوداء ربما تكون مستقرة، لكنهم لم يقدموا تلك الأساليب في شكل رياضي يستطيع به الفيزيائيون الآخرون حساب جميع تفاصيل أي تغليب مرغوب فيه في الثقب الأسود - سواء كان نابضاً، أو نبضاً، أو كان ينتج موجات الجاذبية من ابتلاع نجم نيوتروني، أو انفجار ثقب أسود، أو أي شيء آخر. كان هذا النقص مثيراً للقلق.

وهكذا، حوّل تشاندراسخار، في عام 1975، وهو في الخامسة والستين من عمره، القوة الكاملة لبراعته الرياضية إلى معادلات تيوكولسكي. وبطاقة لا تنضب وبصيرة

رياضية، انطلق إلى الأمام، من خلال الرياضيات المعقدة، ونظمها في شكل وُصف بأنه «الروكوكو» (على غرار الحقبة الفنية الشهيرة في الفنون التشكيلية): رائع، وبهيج، ومزخرف للغاية». أخيرًا في عام 1983، عندما كان في الثالثة والسبعين من عمره، أكمل مهمته ونشر أطروحة بعنوان النظرية الرياضية للثقوب السوداء، وهي أطروحة ستكون مرجعًا رياضيًا للباحثين في مجال الثقوب السوداء لعقود قادمة، وهي دليل يمكنهم من خلاله استخلاص طرق لحل أي مشكلة تتعلق بتقلبات الثقوب السوداء تروق لهم.

1. كما يتذكر شاول تيوكولسكي، زميل بيل بريس، «كان هذا المؤتمر بمثابة رد فعل بيل على ما اعتبره استفزازًا. كان هناك مؤتمر آخر يعقد، ولم يدع أي منا إليه. لكن كل الشخصيات الرمادية كانت حاضرة، لذلك قرر بيل أن يعقد مؤتمرًا للشباب فقط».

2. في أواخر الثمانينيات، بناءً على اقتراح والدني، طلبت العائلة بأكملها الحرمان الكنسي من كنيسة المورمون ردًا على قمع الكنيسة لحقوق المرأة.

3. هذه الفكرة، رغم صحتها، لم تنتج بعد أي نتائج كبيرة، لذلك لن أناقشها في هذا الكتاب.

4. لقد رأيت يُطلق للعمامة مرة واحدة فقط. في عام 1971، بمناسبة عيد ميلاده الستين، تصادف أن كان ويلر في مأدبة أنيقة في قلعة في كوبنهاجن -مأدبة تكريمًا للمؤتمر الدولي، وليست تكريمًا له. للاحتفال بعيد ميلاده، أطلق ويلر سلسلة من الألعاب النارية خلف كرسي الولايم الخاص به، مما أدى إلى خلق حالة من الفوضى بين رواد المأدبة القريبين.

5. في أواخر الثمانينيات، أصبح من الواضح أن قوانين الميكانيكا الكمومية يمكن أن تؤدي إلى كميات محفوظة إضافية، مرتبطة بـ«المجالات الكمومية» (نوع من المجالات نوقش في الفصل الثاني عشر)؛ وبما أن هذه الكميات، مثل كتلة الثقب، واللف المغزلي، والشحنة الكهربائية، لا يمكن إشعاعها، فإنها ستبقى «شعرا كموميًا» عندما يولد الثقب الأسود. على الرغم من أن هذا الشعر الكمومي قد يؤثر بشدة على المصير النهائي للثقب الأسود المجهرى المتبخر (الفصل الثاني عشر)، إلا أنه ليس له أي تأثير على الثقوب العيانة (الثقوب التي تزن أكثر من وزن الشمس) في هذا الفصل والفصول القليلة التالية، نظرًا لأن الميكانيكا الكمومية بشكل عام غير مهمة على المقاييس العيانة.

6. قدم جزءًا رياضيًا مهمًا في دليل الثبات، بشكل مستقل، ستيفن ديتويلر وجيمس إيسر في شيكاغو، وقدم جزءًا مفقودًا من الدليل بعد عام جيمس هارتل ودان ويلكنز في جامعة كاليفورنيا في سانتا باربارا.

7. كان من المفترض أن يمنحني تشاندراسخار اشتراكًا في مجلة Playboy كمكافأة لي، لكن والدني وأخواتي الناشطات في مجال حقوق المرأة جعلنني أشعر بالذنب لدرجة أنني طلبت بدلًا من ذلك الاشتراك في The Listener (مجلة كانت تصدر عن BBC).

الفصل الثامن: البحث

وفي هذا الفصل، طريقة البحث عن الثقوب السوداء في السماء حيث اقترحت وتُوِّبعت ونجحت (على الأرجح)

الطريقة

تخيل نفسك روبرت أوبنهايمر.

إنه العام 1939؛ لقد أقنعت نفسك للتو أن النجوم الضخمة، عندما تموت، لا بد أن تشكّل ثقوبًا سوداء (الفصلان الخامس والسادس). هل تجلس الآن مع علماء الفلك وتخطط للبحث في السماء بحثًا عن دليل على وجود الثقوب السوداء بالفعل؟ لا، على الإطلاق.

إذا كنت أوبنهايمر، فإن اهتماماتك ستكون في الفيزياء الأساسية؛ قد تعرض أفكارك على علماء الفلك، لكن انتباهك الآن منصب على النواة الذرية وعلى اندلاع الحرب العالمية الثانية، والتي ستشركك قريبًا في تطوير القنبلة الذرية.

وماذا عن علماء الفلك؟ هل يأخذون فكرتك؟

لا، على الإطلاق.

هناك نزعة محافظة في الخارج في المجتمع الفلكي، باستثناء ذلك «الرجل المتوحش» زفيكي، الذي يدفع نجومه النيوترونية إلى الواجهة (الفصل الخامس). إن النظرة العالمية التي رفضت الكتلة القصوى لتشاندراسخار بالنسبة إلى نجم قزم أبيض (الفصل الرابع) لا تزال سائدة.

تخيل نفسك جون أرثشيلد ويلر.

إنه العام 1962؛ لقد بدأت تقتنع، بعد مقاومة شديدة، بأن بعض النجوم الضخمة لا بد أن تخلق ثقوبًا سوداء عندما تموت (الفصلان السادس والسابع).

هل تجلس الآن مع علماء الفلك وتخطط للبحث عنها؟
لا، على الإطلاق.

إذا كنت ويلر، فإن اهتمامك سينصب على الزواج الناري بين النسبية العامة والميكانيكا الكمية، وهو زواج قد يحدث في مركز الثقب الأسود (الفصل الثالث عشر).
إنك تعظ علماء الفيزياء بأن نقطة النهاية للانفجار النجمي هي أزمة كبيرة، قد ينشأ عنها فهم جديد عميق.

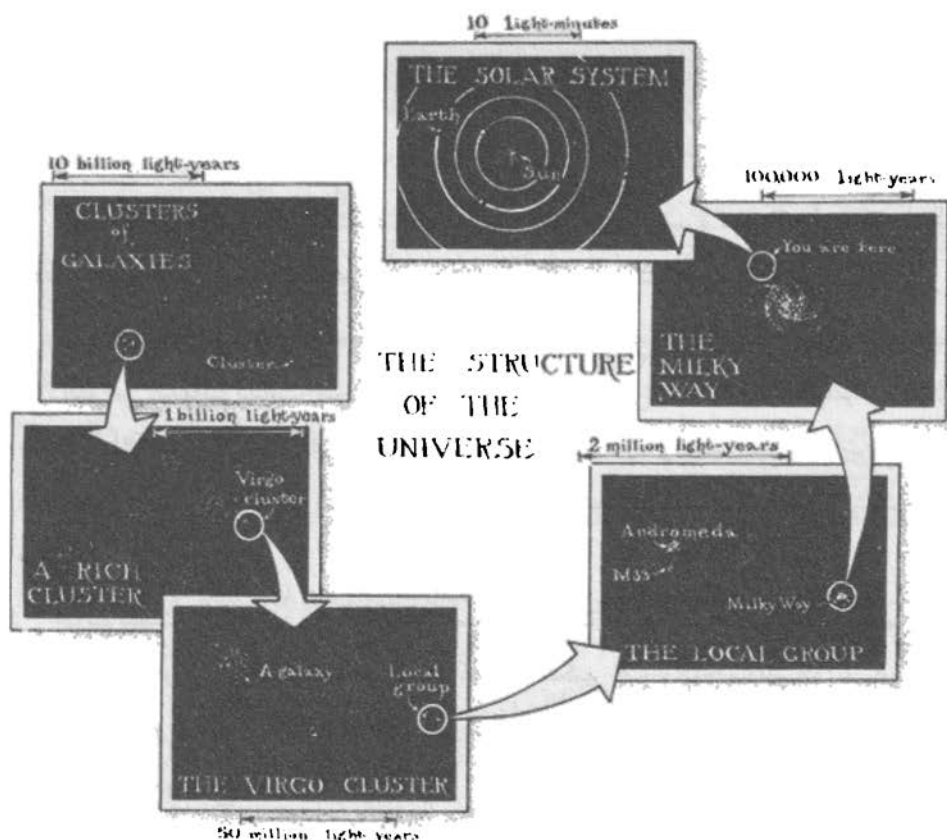
أنت لا تعظ علماء الفلك بضرورة البحث عن الثقوب السوداء، أو حتى النجوم النيوترونية. لا تقول شيئاً عن عمليات البحث عن الثقوب السوداء، وفيما يتعلق بالفكرة الواعدة أكثر للبحث عن نجم نيوتروني، فإنك تردد في كتاباتك وجهة النظر المحافظة للمجتمع الفلكي: «إن جسم كهذا سيكون قطره في حدود 30 كيلومتراً... سوف يبرد بسرعة... هناك أمل ضئيل في رؤية مثل هذا الجسم الخافت مثل رؤية كوكب يدور حول نجم آخر» (وبعبارة أخرى، لا أمل على الإطلاق).
تخيل نفسك ياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيتش.

إنه عام 1964؛ لقد انتهى ميخائيل بودوريتس، وهو عضو في فريق تصميم القنبلة الهيدروجينية القديم، للتو من محاكاة الحاسوب للانفجار النجمي بما في ذلك تأثيرات الضغط وموجات الصدمة والحرارة والإشعاع والقذف الكتلي (الفصل السادس). أنتجت عمليات المحاكاة ثقباً أسود (أو بعبارة أكثر دقة، نسخة حاسوبية منه). أنت الآن مقتنع تماماً بأن بعض النجوم الضخمة، عندما تموت، لا بد أن تشكّل ثقباً سوداء. هل ستجلس بعد ذلك مع علماء الفلك وتخطط للبحث عنها؟
نعم، بكل الوسائل.

إذا كنت زيلدوفيتش، فأنت لا تتعاطف كثيراً مع هوس ويلر بنقطة النهاية للانفجار النجمي. سيخفي أفق الثقب نقطة النهاية؛ سيكون غير مرئي. وعلى النقيض من ذلك، قد يكون من الممكن ملاحظة الأفق نفسه وتأثير الثقب على المناطق المحيطة به؛ كل ما عليك فعله هو أن تكون ذكياً بما يكفي لتعرف الطريقة.

إن فهم الجزء المرئي من الكون هو هاجسك، إذا كنت زيلدوفيتش؛ فكيف يمكنك مقاومة التحدي المتمثل في البحث عن الثقوب السوداء؟

من أين يجب أن يبدأ بحثك؟ من الواضح أنك يجب أن تبدأ من مجرتنا درب التبانة، وهي مجموعتنا ذات الشكل القرصي المكونة من 1012 نجم. أما المجرة الكبيرة الأخرى الأقرب إلى مجرتنا، وهي مجرة المرأة المسلسلة، فتبعد عنا مليوني سنة ضوئية؛ أي 20 مرة أكبر من حجم مجرة درب التبانة؛ انظر الشكل 8.1. وبالتالي، فإن أي نجم أو سحابة غازية أو أي جسم آخر في مجرة المرأة المسلسلة سيظهر أصغر بـ 20 مرة وأخف 400 مرة من مثيله في درب التبانة. لذلك، إذا كان من الصعب اكتشاف الثقوب السوداء في مجرة درب التبانة، فسيكون اكتشافها في مجرة المرأة المسلسلة أصعب بـ 400 مرة، وأصعب بكثير في المليار مجرة أو نحو ذلك من المجرات الكبيرة فيما وراء (خارج) المرأة المسلسلة.



8.1 رسم تخطيطي لبنية الكون.

إذا كان البحث في مكان قريب بهذه الأهمية، فلماذا لا نبحث في نظامنا الشمسي، وهو العالم الممتد من الشمس إلى كوكب بلوتو؟ هل يمكن أن يوجد ثقب أسود هنا، بين الكواكب، من دون أن يلاحظه أحد بسبب ظلامه؟ لا، من الواضح لا.

ستكون قوة جذب مثل هذا الثقب أكبر من قوة جاذبية الشمس؛ فمن شأنه أن يعطل مدارات الكواكب تمامًا؛ لا يوجد مثل هذا الاضطراب. ولذلك، فإن أقرب ثقب يجب أن يكون أبعد بكثير من مدار بلوتو.

إلى أي مدى أبعد من بلوتو؟ يمكنك إجراء تقدير تقريبي. إذا تشكلت الثقوب السوداء نتيجة موت نجوم ضخمة، فمن غير المرجح أن يكون أقرب ثقب أقرب بكثير من أقرب نجم ضخم، الشعري اليمانية، على بُعد 8 سنوات ضوئية من الأرض؛ ومن المؤكد تقريبًا أنه لن يكون أقرب من أقرب النجوم (باستثناء الشمس)، رجل القنطور، على مسافة 4 سنوات ضوئية.

كيف يمكن لعالم فلكي اكتشاف ثقب أسود على مسافة كبيرة كهذه؟ هل يمكن لعالم الفلك أن يراقب السماء بحثًا عن جسم متحرك مظلم يحجب ضوء النجوم خلفه؟ لا، فمع محيطه الذي يبلغ نحو 50 كيلومترًا ومسافته التي لا تقل عن 4 سنوات ضوئية، فإن القرص المظلم للثقب سوف يقابل زاوية لا تزيد على 10-7 ثانية قوسية. وبعادل ذلك سُمك شعرة الإنسان تقريبًا كما يُرى من مسافة القمر، وأصغر بـ 10 ملايين مرة من دقة أفضل التلسكوبات في العالم. سيكون الجسم المظلم المتحرك صغيرًا بشكل غير مرئي.

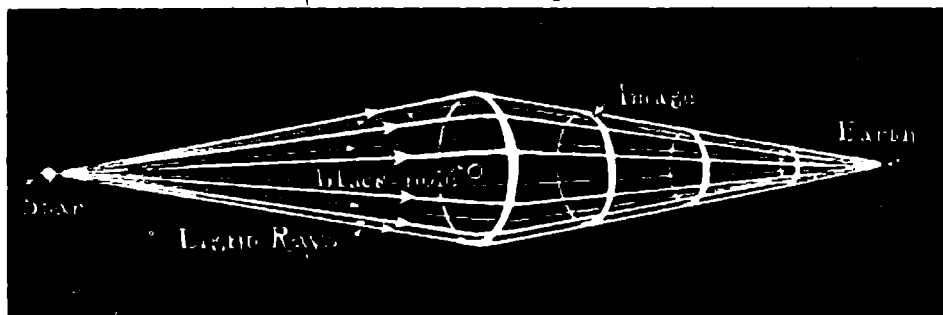
إذا لم يتمكن المرء من رؤية القرص المظلم للثقب عندما يمر الثقب أمام النجم، فهل يمكن للمرء أن يرى جاذبية الثقب تعمل كعدسة لتكبير ضوء النجم (الشكل 8.2)؟ هل يمكن أن يبدو النجم خافتًا في البداية، ثم يسطع مع تحرك الثقب بين الأرض والنجم، ثم يخفت مرة أخرى مع تحرك الثقب؟

لا، طريقة البحث هذه أيضًا ستفشل.

ويعتمد سبب فشلها على ما إذا كان النجم والثقب يدور أحدهما حول الآخر، وبالتالي يكون أحدهما قريبًا من الآخر، أو أنهما مفصولان بمسافات نموذجية بين النجوم. إذا كانا

قريبين من بعضهما، فإن الثقب الصغير سيكون مثل عدسة مكبرة محمولة باليد موضوعة بشكل مستقيم على حافة النافذة في الطابق التاسع والثمانين من مبنى إمباير ستيت، ومن ثم محاولة مشاهدته من مسافة عدة كيلومترات.

وبطبيعة الحال، فإن العدسة المكبرة الصغيرة ليست لديها القدرة على تكبير شكل المبنى، وبالمثل فإن الثقب ليس له أي تأثير على مظهر النجم.



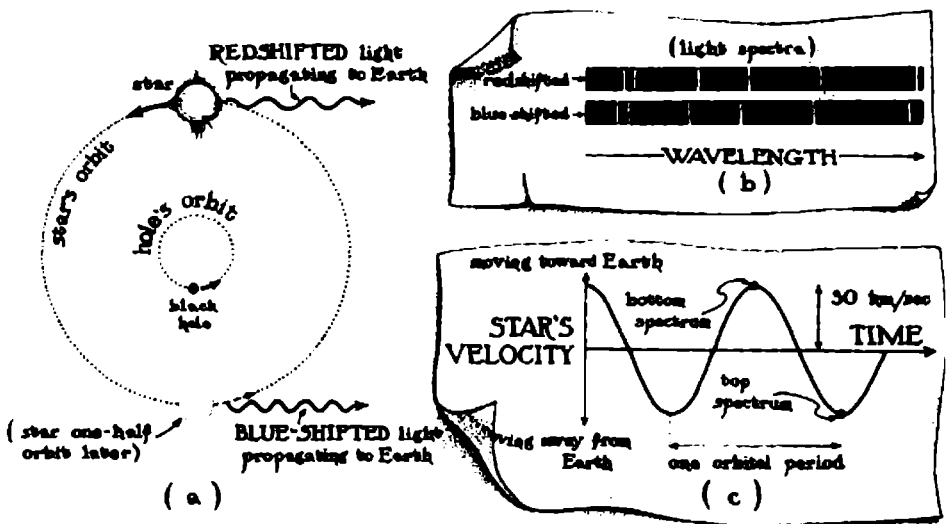
8.2 يجب أن تعمل جاذبية الثقب الأسود كعدسة لتغيير الحجم والشكل الظاهري للنجم كما يُرى من الأرض. في هذا الشكل، يقع الثقب على الخط الفاصل بين النجم والأرض، لذا يمكن لأشعة الضوء الصادرة عن النجم أن تصل إلى الأرض بشكل متساوٍ عن طريق المرور فوق قمة الثقب، أو تحت قاعه، أو حول المقدمة، أو حول ظهره. تتحرك جميع أشعة الضوء التي تصل إلى الأرض إلى الخارج من النجم على شكل مخروط متباعد؛ في أثناء مرورها بالثقب، تنحني نحو الأرض؛ ثم تصل إلى الأرض على شكل مخروط متقارب. والصورة الناتجة للنجم في سماء الأرض هي حلقة رقيقة. تحتوي هذه الحلقة على مساحة سطحية أكبر بكثير، وبالتالي سطوع إجمالي أكبر بكثير، مما ستكون عليه صورة النجم إذا كان الثقب الأسود غائبًا. الحلقة صغيرة جدًا بحيث لا يمكن اكتشافها بواسطة التلسكوب، ولكن يمكن زيادة سطوع النجم الإجمالي بعامل قدره 10 أو 100 أو أكثر.

إذا كان النجم والثقب متباعدين كما في الشكل 8.2، فإن قوة التنبير يمكن أن تكون كبيرة؛ أي زيادة قدرها 10 أو 100 أو أكثر في سطوع النجم. لكن المسافات بين النجوم شاسعة جدًا لدرجة أن الاصطفاف الضروري بين ثقب والأرض والنجم سيكون حدثًا نادرًا للغاية، نادرًا جدًا بحيث يصبح البحث عنه ميؤوسًا منه. بالإضافة إلى ذلك، حتى لو رصد هذا التنبير، فإن أشعة الضوء من النجم إلى الأرض سوف تمر عبر الثقب على مسافة كبيرة جدًا (الشكل 8.2) بحيث يكون هناك مجال لنجم بأكمله ليجلس في موقع الثقب ويمثل دور العدسة. وبالتالي، لا يستطيع عالم الفلك على الأرض معرفة ما إذا كانت العدسة ثقبًا أسود أم مجرد نجم عادي ولكنه خافت.

لا بد أن زيلدوفيش قد مر بسلسلة من الاستدلالات تشبه هذه إلى حد كبير عندما كان يبحث عن طريقة لرصد الثقوب السوداء. وأدت سلسلته أخيرًا إلى طريقة واعدة (الشكل 8.3): لنفترض أن ثقبًا أسود ونجمًا يدور أحدهما حول الآخر (يشكلان نظامًا ثنائيًا). عندما يدرب علماء الفلك تلسكوباتهم على هذا الثنائي، فسوف يرون الضوء من النجم فقط؛ سيكون الثقب غير مرئي. ومع ذلك، فإن ضوء النجم سيعطي دليلًا على وجود الثقب: فبينما يتحرك النجم حول الثقب الموجود في مداره، فإنه سيتحرك أولاً نحو الأرض ثم بعيدًا عنها. عندما يتحرك النجم نحونا، يجب أن يؤدي تأثير دوبلر إلى تحويل ضوء النجم نحو اللون الأزرق، وعندما يتحرك بعيدًا، نحو الأحمر. يمكن لعلماء الفلك قياس مثل هذه التحولات بدقة عالية، لأن ضوء النجم، عند إرساله عبر جهاز قياس الطيف (شكل متطور من المنشور)، يُظهر خطوطًا طيفية حادة، فيبرز بوضوح تغير طفيف في الطول الموجي (اللون) لمثل هذا الخط. من خلال قياس التحول في الطول الموجي، يمكن لعلماء الفلك استنتاج سرعة النجم نحو الأرض أو بعيدًا عنها، ومن خلال رصد التحول بالنسبة إلى الزمن، يمكنهم استنتاج كيفية تغير سرعة النجم بالنسبة إلى الزمن. قد يتراوح حجم هذه التغيرات عادةً بين 10 و100 كيلومتر في الثانية، وتبلغ دقة القياسات عادةً 0.1 كيلومتر في الثانية.

ماذا يمكن للمرء أن يتعلمه من مثل هذه القياسات عالية الدقة لسرعة النجم؟ يمكن للمرء أن يتعلم شيئًا عن كتلة الثقب: كلما زادت ضخامة الثقب، زادت قوة سحبه للنجم، وبالتالي يجب أن تكون قوى الطرد المركزي التي يقاوم بها النجم الانجذاب إلى الثقب أقوى. ولكي يكتسب النجم قوى طرد مركزية قوية، يجب أن يتحرك بسرعة في مداره. وبالتالي، فإن السرعة المدارية الكبيرة تقترن مع كتلة الثقب الأسود الكبيرة.

للبحث عن ثقب أسود، يجب على علماء الفلك البحث عن نجم تُظهر أطيافه تحولًا دوريًا واضحًا من الأحمر إلى الأزرق إلى الأحمر ثم إلى الأزرق. مثل هذا التحول هو علامة واضحة على أن النجم لديه رفيق. وعلى علماء الفلك قياس أطياف النجم ليستدلوا على سرعة النجم حول رفيقه، ومن تلك السرعة يستنتجون كتلة الرفيق. إذا كان الرفيق ضخماً جدًا ولا يرى منه أي ضوء على الإطلاق، فمن المحتمل أن يكون الرفيق ثقبًا أسود. كان هذا اقتراح زيلدوفيش.



8.3 طريقة زيلدوفيش المقترحة للبحث عن الثقوب السوداء. (a) يدور الثقب والنجم أحدهما حول الآخر. إذا كان الثقب أثقل من النجم فإن مداره أصغر من مدار النجم كما هو موضح (أي بينما يتحرك الثقب قليلاً فقط، يتحرك النجم كثيراً). ولو كان الثقب أخف من النجم لكان مداره هو الأكبر (أي بينما سيتحرك النجم قليلاً فقط، يتحرك الثقب كثيراً). عندما يتحرك النجم بعيداً عن الأرض، كما هو موضح، ينزاح ضوءه نحو اللون الأحمر (نحو الطول الموجي الأطول). (b) يُرسل الضوء، عند دخوله إلى التلسكوب الموجود على الأرض، من خلال جهاز قياس الطيف لتكوين طيف. يظهر هنا طيفان، الأعلى يسجل عندما يتحرك النجم بعيداً عن الأرض، والأسفل بعد نصف مدار عندما يتحرك النجم نحو الأرض. تنزاح الأطوال الموجية للخطوط الحادة في الأطياف بعضها بالنسبة إلى بعض. (c) من خلال قياس تسلسل هذه الأطياف، يستطيع علماء الفلك تحديد كيفية تغير سرعة النجم نحو الأرض وبعيداً عنها بالنسبة إلى الزمن، ومن تلك السرعة المتغيرة، يمكنهم تحديد كتلة الجسم الذي يدور حوله النجم. إذا كانت كتلته أكبر من نحو شمسين ولم يُر ضوء من الجسم، فقد يكون الجسم ثقباً أسود.

على الرغم من أن هذه الطريقة كانت متفوقة إلى حد كبير على أي طريقة سابقة، فإنها مع ذلك محفوفة بالعديد من المآزق، والتي سأناقش فقط اثنين منها: أولاً، وزن الرفيق المظلم ليس سهلاً. لا تعتمد السرعة المقيسة للنجم على كتلة النجم المرافق فحسب، بل أيضاً على كتلة النجم نفسه، وعلى ميل المستوى المداري الثنائي إلى خط رؤيتنا. في حين أنه يمكن استنتاج كتلة النجم وميله من خلال ملاحظات الرصد الدقيقة، إلا أنه لا يمكن للمرء أن يفعل ذلك بسهولة أو بدقة جيدة. ونتيجة لذلك، يمكن للمرء أن يرتكب

بسهولة أخطاء كبيرة (على سبيل المثال، عامل 2 أو 3) في تقدير كتلة الرفيق المظلم. ثانيًا، الثقوب السوداء ليست النوع الوحيد من الرفقاء المظلمين الذين قد يمتلكهم النجم. على سبيل المثال، إذا كان هذا الرفيق نجمًا نيوترونيًا فسيكون مظلمًا أيضًا. للتأكد من أن الرفيق ليس نجمًا نيوترونيًا، يجب أن يكون المرء واثقًا جدًا بأنه أثقل بكثير من الحد الأقصى المسموح به لنجم نيوتروني، نحو 2 مثل كتلة شمسية. يمكن أيضًا أن يكون النجمان النيوترونيان اللذان يدور أحدهما في مدار ضيق حول الآخر مظلمين ويمكن أن يصل وزنهما إلى 4 شمس. قد يكون الرفيق المظلم مثل هذا النظام؛ أو قد يكونان قزمين أبيضين باردين في مدار ضيق بكتلة إجمالية تعادل 3 شمس. وهناك أنواع أخرى من النجوم، رغم أنها ليست مظلمة تمامًا، فإنها يمكن أن تكون ضخمة ومعتمدة بشكل غير طبيعي. يجب على المرء أن ينظر بعناية شديدة إلى الأطياف المقاسة للتأكد من عدم وجود أي علامة على وجود كميات ضئيلة من الضوء في هذه النجوم.

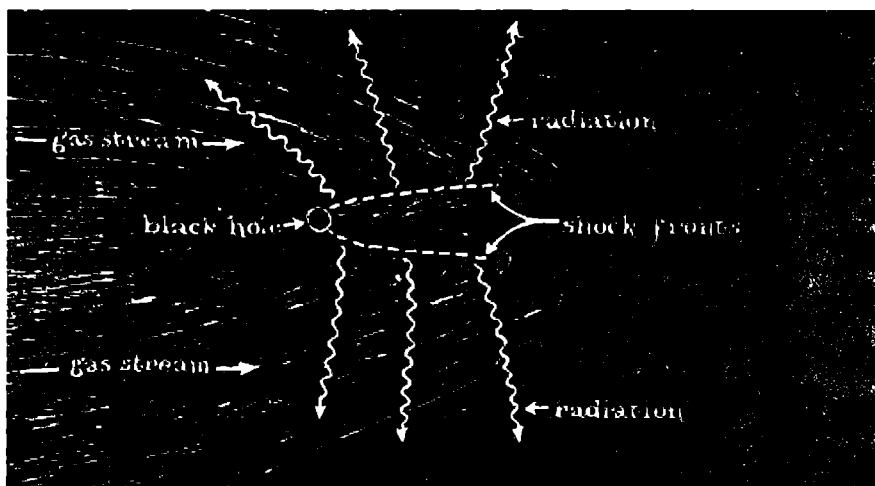
لقد عمل علماء الفلك بجِد على مدى العقود السابقة لمراقبة وفهرسة أنظمة النجوم الثنائية، لذلك لم يكن من الضروري أن يُجري زيلدوفيش بحثه مباشرة في السماء؛ يمكنه البحث في كتالوجات علماء الفلك بدلاً من ذلك. ومع ذلك، لم يكن لديه الوقت ولا الصبر لتمشيط الكتالوجات بنفسه، ولم تكن لديه الخبرة لتجنب كل المآزق. ولذلك، وكما كانت عاداته في مثل هذه الحالة، فقد استحوذ على وقت شخص آخر ومواهبه - في هذه الحالة، أوكتاي جوسينوف، وهو طالب دراسات عليا في علم الفلك يعرف الكثير عن النجوم الثنائية. وجد جوسينوف وزيلدوفيش معًا خمسة مرشحين واعدنين للثقوب السوداء من بين مئات الأنظمة الثنائية الموثقة جيدًا في الفهارس.

على مدار السنوات القليلة التالية، لم يُولِّ علماء الفلك سوى القليل من الاهتمام لهؤلاء المرشحين الخمسة للثقوب السوداء. لقد كنت منزعجًا إلى حد ما من عدم اهتمام علماء الفلك، لذلك في عام 1968 عيّنت فيرجينيا تريمبل، وهي عالمة فلك في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، لمساعدتي في مراجعة وتوسيع قائمة زيلدوفيش - جوسينوف. تريمبل، على الرغم من مرور أشهر قليلة على حصولها على درجة الدكتوراه، فقد اكتسبت بالفعل معرفة هائلة بتقاليد علم الفلك. لقد كانت تعرف كل المآزق التي قد نواجهها - تلك الموصوفة أعلاه وغيرها الكثير - وكان بإمكانها قياسها بدقة. من خلال البحث في الفهارس بأنفسنا، ومن خلال جمع جميع البيانات المنشورة التي يمكن أن نجدها عن

الثنائيات الواعدة، توصلنا إلى قائمة جديدة تضم ثمانية مرشحين للثقوب السوداء. لسوء الحظ، في جميع الحالات الثماني، تمكنت تريمبل من اختراع تفسير شبه معقول غير متعلق بالثقب الأسود لسبب كون الرفيق مظلمًا للغاية. واليوم، بعد مرور ربع قرن، لم ينبُج أي من مرشحيننا. ويبدو الآن أنه من المحتمل ألا يكون أي منها ثقبًا أسود حقًا.

عرف زيلدوفيش، حينما تصور الأمر، أن طريقة هذا البحث عن النجم الثنائي مقامرة، ولم تكن مضمونة النجاح بأي حال من الأحوال. ولحسن الحظ، فإن عصفه الذهني حول كيفية البحث عن الثقوب السوداء أنتج فكرة ثنائية، وهي فكرة تصورها في وقت واحد وبشكل مستقل، في عام 1964، إدوين سالبيتر، عالم الفيزياء الفلكية في جامعة كورنيل في إيثاكا، نيويورك.

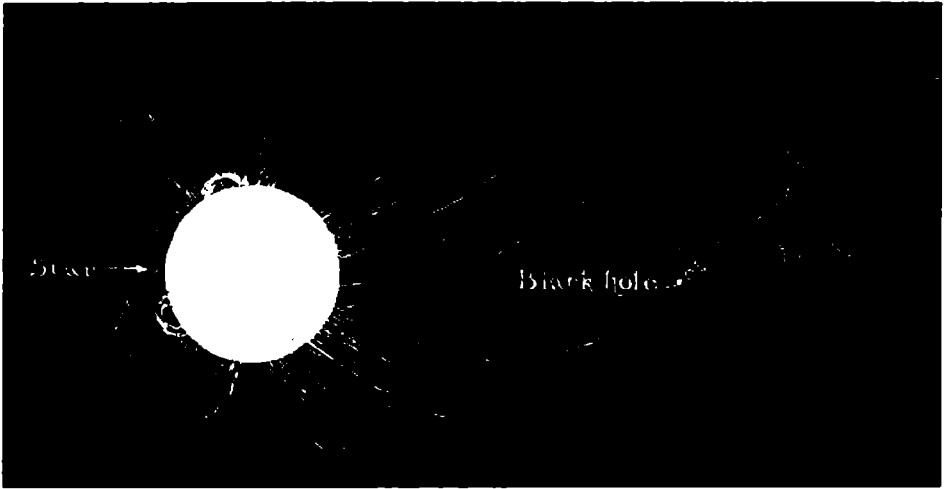
لنفترض أن ثقبًا أسود يتحرك عبر سحابة من الغاز، أو، كما يرى الثقب، سحابة غازية تمر عبره (الشكل 8.4). بعد ذلك، سوف تتطاير تيارات من الغاز، التي تتسارع إلى سرعة قريبة من سرعة الضوء بفعل جاذبية الثقب، حول الجانبين المتقابلين من الثقب وتتحطم معًا في مؤخرة الثقب. الاصطدام، سيشكّل جبهة صدمة (زيادة مفاجئة وكبيرة في الكثافة)، سيحول طاقة سقوط الغاز الهائلة إلى حرارة، مما يؤدي إلى انطلاق إشعاعي قوي. في الواقع، سيكون الثقب الأسود بمثابة آلة لتحويل بعض كتلة الغاز الساقط إلى حرارة ثم إلى إشعاع. واستنتج زيلدوفيش وسالبيتر أن هذه «الآلة» يمكن أن تكون ذات كفاءة عالية، أي أكثر كفاءة بكثير، على سبيل المثال، من حرق الوقود النووي.



8.4 اقتراح سالبيتر-زيلدوفيش لكيفية اكتشاف الثقب الأسود.

فكر زيلدوفيش وفريقه في هذه الفكرة لمدة عامين، حيث نظروا إليها أولاً من هذا الاتجاه ومن ثم من الاتجاه الآخر، باحثين عن طرق لجعلها واعدة أكثر. ومع ذلك، لم تكن سوى واحدة من عشرات الأفكار التي كانوا يسعون وراءها حول الثقوب السوداء، والنجوم النيوترونية، والمستعرات العظمية، وأصل الكون، ولم تحظَ إلا بالقليل من الاهتمام. ثم، في أحد أيام عام 1966، وفي مناقشة مكثفة، أدرك زيلدوفيش ونوفيكوف معاً أن بإمكانهما الجمع بين فكرة النجم الثنائي وفكرة الغاز الساقط (الشكل 8.5).

تهب رياح قوية من الغاز (معظمها من الهيدروجين والهيليوم) على أسطح بعض النجوم. (تبعث الشمس مثل هذه الرياح، وإن كانت ضعيفة). لنفترض أن ثقباً أسود ونجمًا تنبعث منه الرياح يدور بعضهما حول بعض. سوف يلتقط الثقب بعضًا من غاز الرياح، فيسخنه في جبهة صادمة، ويجبره على الإشعاع. وعلى السبورة التي تبلغ مساحتها مترًا مربعًا في شقة زيلدوفيش في موسكو، قدّر هو ونوفيكوف درجة حرارة غاز الصدمة: عدة ملايين من الدرجات.



8.5 اقترح زيلدوفيش-نوفيكوف حول كيفية البحث عن الثقب الأسود. عن طريق التقاط الرياح التي تهب على سطح النجم المرافق بواسطة جاذبية الثقب. تتأرجح تيارات الغاز الصادرة عن الرياح حول الثقب في اتجاهين متعاكسين وتتصادم في جبهة صدمة حادة، حيث تسخن إلى درجة حرارة ملايين الدرجات وتصدر الأشعة السينية. يجب أن ترى التلسكوبات البصرية النجم وهو يدور حول رفيق ثقيل ومظلم. ويجب أن ترى تلسكوبات الأشعة السينية الأشعة السينية القادمة من الرفيق.

الغاز عند درجة الحرارة هذه لا ينبعث منه الكثير من الضوء. تنبعث منه الأشعة السينية بدلاً من ذلك. وهكذا، أدرك زيلدوفيش ونوفيكوف، من بين تلك الثقوب السوداء التي تدور حول النجوم المرافقة، أن القليل منها (وإن لم يكن معظمها) قد يلمع بشكل مشرق بالأشعة السينية.

للبحث عن الثقوب السوداء، يمكن للمرء استخدام مجموعة من التلسكوبات البصرية وتلسكوبات الأشعة السينية. ستكون الثقوب السوداء المرشحة عبارة عن ثنائيات، حيث يكون أحد الجسمين نجمًا ساطعًا بصريًا ولكنه مظلم للأشعة السينية، والآخر عبارة عن جسم مظلم بصريًا ولكن ساطع للأشعة السينية (الثقب الأسود). وبما أن النجم النيوتروني يمكنه أيضًا التقاط الغاز من رفيقه، وتسخينه في جهات الصدمة، وإنتاج الأشعة السينية، فإن وزن الجسم المظلم بصريًا ولكن المشع بالأشعة السينية، سيكون أمرًا بالغ الأهمية. يجب على المرء أن يكون متأكدًا من أنه أثقل من شمسين وبالتالي ليس نجمًا نيوترونيًا. لم تكن هناك سوى مشكلة واحدة في استراتيجية البحث هذه. في عام 1966، كانت تلسكوبات الأشعة السينية بدائية للغاية.

البحث

مشكلة الأشعة السينية، إذا كنت عالمًا فلكيًا، هي أنها لا تستطيع اختراق الغلاف الجوي للأرض. (إذا كنت مجرد إنسان فهذه نعمة جمّة، لأن الأشعة السينية تسبّب السرطان والطفرات).

لحسن الحظ، كان الفيزيائيون التجريبيون ذوو الرؤية، بقيادة هربرت فريدمان من مختبر أبحاث البحرية (NRL)، يعملون منذ الأربعينيات من القرن الماضي لوضع الأساس لعلم فلك الأشعة السينية الفضائية. بدأ فريدمان وزملاؤه، بعد فترة وجيزة من الحرب العالمية الثانية، باستخدام أدوات الطيران لدراسة الشمس باستخدام صواريخ V-2 الألمانية التي استولوا عليها. وقد وصف فريدمان رحلتهم الأولى، في 28 يونيو 1946، والتي حملت في مقدمة الصاروخ مطيافًا لدراسة إشعاع الشمس فوق البنفسجي البعيد. (الأشعة فوق البنفسجية البعيدة، مثل الأشعة السينية، لا يمكنها اختراق الغلاف الجوي للأرض). وبعد التحليق فوق الغلاف الجوي لفترة وجيزة وجمع البيانات، «عاد الصاروخ إلى الأرض،

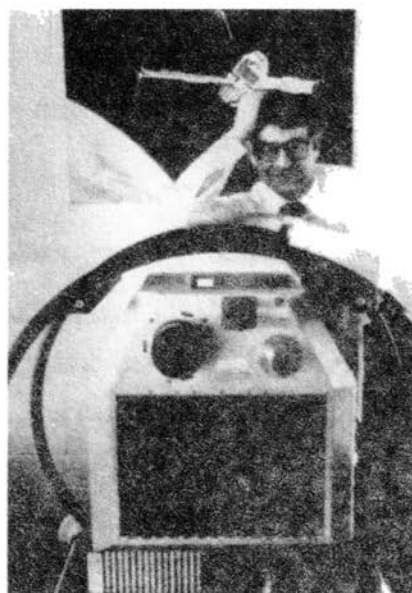
ومقدمته إلى الأسفل، في رحلة انسيابية ودفن نفسه في حفرة هائلة يبلغ ارتفاعها قرابة 80 قدمًا. بقطر وعمق 30 قدمًا. لقد عُثر عليه بعد عدة أسابيع من الحفر مجرد كومة صغيرة من الحطام الذي لا يمكن التعرف عليه. كان الأمر كما لو أن الصاروخ قد تبخر عند الاصطدام».

ومن هذه البداية المشؤومة، أدى الإبداع والمثابرة والعمل الجاد الذي قام به فريدمان وآخرون إلى تحقيق نجاح علم فلك الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية خطوة بخطوة. بحلول عام 1949، كان فريدمان وزملاؤه يطلقون عدادات جيجر على صواريخ V-2 لدراسة الأشعة السينية القادمة من الشمس. بحلول أواخر الخمسينيات من القرن الماضي، كان فريدمان وزملاؤه، الذين كانوا يطلقون عداداتهم على صواريخ أير-بي أمريكية الصنع، يدرسون الأشعة فوق البنفسجية ليس فقط من الشمس، ولكن أيضًا من النجوم. لكن الأشعة السينية كانت مسألة أخرى. في كل ثانية، تطلق الشمس مليونًا من الأشعة السينية على كل سنتيمتر مربع من عداد جيجر، لذلك كان اكتشاف الشمس بالأشعة السينية أمرًا سهلًا نسبيًا. ومع ذلك، تشير التقديرات النظرية إلى أن ألمع نجوم الأشعة السينية ستكون أضعف بمليار مرة من الشمس. إن الكشف عن نجم خافت إلى هذا الحد يتطلب كاشفًا للأشعة السينية أكثر حساسية بعشرة ملايين مرة من ذلك الذي كان فريدمان يطير به في عام 1958. وكان مثل هذا التحسن مهمة صعبة، ولكنه لم يكن مستحيلًا.

وبحلول عام 1962، تحسنت أجهزة الكشف بمقدار 10,000 ضعف. ومع بقاء عامل آخر من الألف، بدأت مجموعات بحثية أخرى، أعجبت بتقدم فريدمان، في التنافس معه. ومنهم فريق بقيادة ريكاردو جياكوني، والذي سيصبح منافسًا هائلًا.

بطريقة غريبة، ربما تقاسم زيلدوفيش المسؤولية عن نجاح جياكوني. في عام 1961، ألغى الاتحاد السوفيتي بشكل غير متوقع الوقف السوفيتي الأمريكي المتبادل لمدة ثلاث سنوات لاختبار الأسلحة النووية، واختبر أقوى قنبلة فجرها البشر على الإطلاق -قنبلة صممها فريقا زيلدوفيش وساخاروف في «التركيب» (الفصل السادس). في حالة من الذعر، أعد الأمريكيون اختبارات قنابل جديدة خاصة بهم. ستكون هذه الاختبارات الأمريكية الأولى في عصر المركبات الفضائية التي تدور حول الأرض. لأول مرة سيكون من الممكن قياس الأشعة السينية وأشعة جاما والجسيمات عالية الطاقة الصادرة من

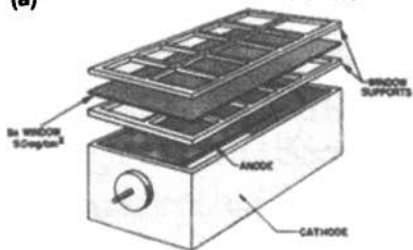
الانفجارات النووية من الفضاء. وستكون مثل هذه القياسات حاسمة لرصد اختبارات القنابل السوفيتية المستقبلية. ومع ذلك، فإن إجراء مثل هذه القياسات على سلسلة الاختبارات الأمريكية الوشيكة يتطلب برنامجًا مكثفًا. أوكلت مهمة تنظيمها وقيادتها إلى جياكوني، وهو فيزيائي تجريبي يبلغ من العمر ثمانية وعشرين عامًا في شركة العلوم والهندسة الأمريكية (شركة خاصة في كامبريدج، ماساتشوستس)، والذي بدأ مؤخرًا في تصميم واستخدام أجهزة كشف الأشعة السينية مثل كاشف فريدمان. أعطت القوات الجوية الأمريكية جياكوني كل الأموال التي يحتاج إليها، لكن مع القليل من الوقت. وفي أقل من عام، عزز فريق علم الفلك بالأشعة السينية المكون من ستة أشخاص بسبعين شخصًا جديدًا، وصمّم وبنى واختبر مجموعة متنوعة من أدوات مراقبة انفجارات الأسلحة، وأطلقها بمعدل نجاح 95 بالمائة في أربعة وعشرين صاروخًا وستة أقمار صناعية. وقد ساهمت هذه التجربة في تحويل الأعضاء الأساسيين في مجموعته إلى فريق مخلص ومتفانٍ وذو مهارات عالية، ومجهز بشكل مثالي للتغلب على جميع المنافسين في تأسيس علم فلك الأشعة السينية.



على اليسار: هربرت فريدمان، بحمولة من صاروخ أير-بي، في عام 1968. على اليمين: ريكاردو جياكوني مع كاشف الأشعة السينية أوهورو، كاليفورنيا. 1970. [اليسار: إهداء من مختبر أبحاث البحرية الأمريكية؛ اليمين: إهداء ر. جياكوني].

اتخذ فريق جياكوني المتمرس خطوته الفلكية الأولى بالبحث عن الأشعة السينية القادمة من القمر، باستخدام كاشف على غرار كاشف فريدمان، ومثل فريدمان، حلق به صاروخ أبرو-بي. أُطلق صاروخهم من وايت ساندز، نيو مكسيكو، قبل دقيقة واحدة من منتصف ليل 18 يونيو 1962، وصعد بسرعة إلى ارتفاع 230 كيلومتراً، ثم سقط مرة أخرى إلى الأرض. لمدة 350 ثانية، كان مرتفعاً بما يكفي فوق الغلاف الجوي للأرض لاكتشاف الأشعة السينية للقمر. وكانت البيانات، التي قاسها عن بُعد على الأرض، محيرة؛ كانت الأشعة السينية أقوى بكثير مما كان متوقعاً. وعندما فُحصت عن كثب، كانت البيانات أكثر إثارة للدهشة. يبدو أن الأشعة السينية لا تأتي من القمر، بل من كوكبة العقرب (الشكل 8.6 b). لمدة شهرين، سعى جياكوني وأعضاء فريقه (هربرت جورسكي، وفرانك باوليني، وبرونو روسي) إلى البحث عن أخطاء في بياناتهم وأجهزتهم. عندما لم يعثروا على أي أخطاء، أعلنوا اكتشافهم: أول نجم للأشعة السينية اكتُشف على الإطلاق، أكثر سطوعاً بمقدار 5000 مرة مما توقعه علماء الفيزياء الفلكية النظرية. وبعد عشرة أشهر، أكد فريق فريدمان الاكتشاف، وأُعطى النجم اسم Sco X-1 (1 كناية عن «الألمع»، وX إشارة إلى «مصدر الأشعة السينية»، وSco للإشارة إلى «المواقع في كوكبة العقرب»).

(a) THIN WINDOW PROPORTIONAL COUNTERS



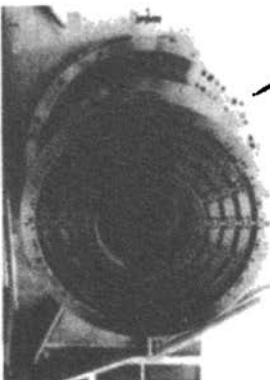
(c)



(e)



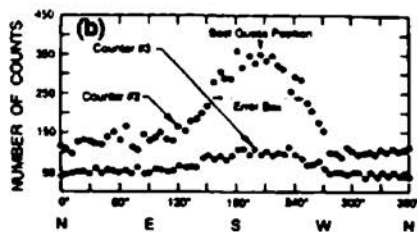
(f)



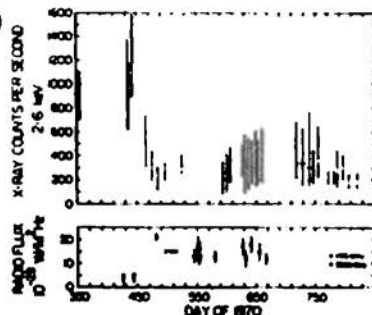
(g)



(h)



(d)



8.6 تحسين التكنولوجيا وأداء أدوات علم الفلك بالأشعة السينية، 1962-1978. (A) التصميم التخطيطي لعداد جيجر الذي استخدمه فريق جياكوني في اكتشافهم لأول نجم للأشعة السينية عام 1962. (b) البيانات الواردة من عداد جيجر، والتي تبين أن النجم لم يكن في موقع القمر؛ لاحظ الدقة الزاوية الرديئة جداً (مربع خطأ كبير)، 90 درجة. (c) كاشف الأشعة السينية أوهورو عام 1970: يوجد داخل الصندوق عداد جيجر محسّن بشكل كبير، وأمام العداد ترى شرائح ستارة معدنية تمنع العداد من اكتشاف الأشعة السينية ما لم تصل بشكل عمودي تقريباً على نافذة العداد للأشعة السينية. (d) قياسات أوهورو للأشعة السينية الصادرة عن الثقب الأسود المرشح Cygnus X-1. (e) رسم تخطيطي (f) صورة للمرآة التي تركز الأشعة السينية في تلسكوب الأشعة السينية لعام 1978 أينشتاين. (g, h) الصور التي التقطها تلسكوب أينشتاين لانتين من الثقوب السوداء المرشحة، Cygnus X-1 و SS-433. [رسومات وصور فردية مقدمة من ر. جياكوني].

كيف أخطأ المنظرون؟ كيف قللوا من قوة الأشعة السينية الكونية بعامل 5000؟ لقد افترضوا، خطأً، أن سماء الأشعة السينية ستهيمن عليها أجسام معروفة بالفعل في السماء البصرية، مثل القمر والكواكب والنجوم العادية التي لا تصدر الأشعة السينية بشكل جيد. ومع ذلك، فإن Sco X-1 ونجوم الأشعة السينية الأخرى التي ستكتشف قريباً لم تكن نوعاً من الأجسام التي شاهدها أي شخص من قبل. كانت عبارة عن نجوم نيوترونية وثقوب سوداء، تلتقط الغاز من رفاق النجوم العادية وتسخره إلى درجات حرارة عالية بالطريقة التي سيقترحها زيلدوفيش ونوفيكوف قريباً (الشكل 8.5 أعلاه). ومع ذلك، فإن استنتاج أن هذه هي بالفعل طبيعة نجوم الأشعة السينية المرصودة، سيتطلب عقدًا آخر من العمل الشاق يدًا بيد من قبل تجريبيين مثل فريدمان وجياكوني ونظريين مثل زيلدوفيش ونوفيكوف.

كان كاشف جياكوني عام 1962 بسيطاً للغاية (الشكل 8.6 a): عبارة عن غرفة غاز مكهربة، مع نافذة رقيقة في وجهها العلوي. عندما تمر الأشعة السينية عبر النافذة إلى الغرفة، تُخرج الإلكترونات من بعض ذرات الغاز؛ وتسحب تلك الإلكترونات بواسطة مجال كهربائي إلى سلك، بحيث تخلق تياراً كهربائياً يعلن عن وصول الأشعة السينية. (تسمى هذه الغرف أحياناً عدادات جيغر وأحياناً عدادات متناسبة). كان الصاروخ الذي يحمل الحجرة يدور بمعدل دورتين في الثانية، وكانت مقدمته تتأرجح ببطء من الإشارة إلى الأعلى إلى الإشارة إلى الأسفل. تسببت هذه الحركات في أن تكتسح نافذة الغرفة مساحة واسعة من السماء، متجهة أولاً في اتجاه واحد ثم في اتجاه آخر. عند توجيهها نحو كوكبة العقرب، سجلت الغرفة العديد من الأشعة السينية. وعندما أشار إلى مكان آخر، فقد سجل القليل من الأشعة السينية. ومع ذلك، نظرًا لأن الأشعة السينية يمكن أن تدخل الغرفة من مجموعة واسعة من الاتجاهات، فإن تقدير الغرفة لموقع Sco X-1 في السماء كان غير مؤكد إلى حد كبير. ويمكنه الإبلاغ فقط عن موقع أفضل تخمين، و**مربع خطأ** يبلغ عرضه 90 درجة، يشير إلى مدى الخطأ المحتمل في أفضل تخمين (انظر الشكل 8.6 b).

لاكتشاف أن Sco X-1 ونجوم الأشعة السينية الأخرى التي سيعث عليها قريباً هي في الواقع نجوم نيوترونية وثقوب سوداء في الأنظمة الثنائية، سيتطلب وجود مربعات خطأ (عدم اليقين في موضعها في السماء) بضع دقائق من الحجم القوسي أو أصغر. لقد كان ذلك أمراً صعباً للغاية: تحسين بمقدار 1000 ضعف في الدقة الزاوية.

وجاء التحسين المطلوب، وغير ذلك الكثير، خطوة بخطوة على مدار الأعوام الستة عشر التالية، مع تنافس العديد من الفرق (فريق فريدمان، وجياكوني، وغيرهما) في كل خطوة على

الطريق. سلسلة متتالية من الرحلات الصاروخية قام بها فريق تلو الآخر باستخدام أجهزة كشف تعمل على التحسين المستمر، أعقبها، في ديسمبر 1970، إطلاق أوهورو، أول قمر صناعي للأشعة السينية (الشكل 8.6 c). كان أوهورو، الذي بناه فريق جياكوني، يحتوي على غرفة مملوءة بالغاز لحصد الأشعة السينية أكبر بمائة مرة من تلك التي طاروا بها على صاروخهم عام 1962. أمام نافذة الغرفة كانت هناك شرائح، مثل الستائر المعدنية، لمنع الغرفة من رؤية الأشعة السينية من أي اتجاه باستثناء بضع درجات حول الانحياز العمودي (الشكل 8.6 d). أوهورو، الذي اكتشف وفهرس 339 نجمًا من نجوم الأشعة السينية، تبعه العديد من أقمار الأشعة السينية المماثلة ولكن ذات الأغراض الخاصة، والتي بناها علماء أمريكيون وبريطانيون وهولنديون. ثم في عام 1978، طار فريق جياكوني بخليفة كبير لأوهورو: أينشتاين، أول تلسكوب حقيقي للأشعة السينية في العالم. نظرًا لأن الأشعة السينية تخترق أي جسم تصطدم به بشكل عمودي، حتى لو كان مرآة، فقد استخدم تلسكوب أينشتاين مجموعة من المرايا المتداخلة التي تنزلق على طولها الأشعة السينية، مثل مزلفة تنزلق على منحدر جليدي (الأشكال 8.6 e, f). ركزت هذه المرايا الأشعة السينية لتكوين صور للسماء بالأشعة السينية بمقدار ثانية قوسية في صور ذات حجم دقيق مثل تلك التي التقطتها أفضل التلسكوبات البصرية في العالم (الأشكال 8.6 g, h).

فمن صاروخ جياكوني إلى تلسكوب أينشتاين في ستة عشر عامًا فقط (من عام 1962 إلى عام 1978)، تحقق تحسن بمقدار 300 ألف ضعف في الدقة الزاوية، وفي هذه العملية حدث ثورة في فهمنا للكون: فقد كشفت الأشعة السينية عن نجوم نيوترونية والثقوب السوداء المرشحة، والغاز الساخن المنتشر الذي يغمر المجرات عندما توجد في مجموعات ضخمة، والغاز الساخن الموجود في بقايا المستعرات العظمية وفي الهالة (الأغلفة الجوية الخارجية) لبعض أنواع النجوم، والجسيمات ذات الطاقات العالية جدًا في أنوية المجرات والنجوم الزائفة.

من بين العديد من الثقوب السوداء المرشحة التي اكتشفها كواشف الأشعة السينية وتلسكوبات الأشعة السينية، كان الدجاجة س-1 (Cyg X-1 اختصارًا) واحدًا من أكثر الثقوب التي يمكن تصديقها. في عام 1974، بعد وقت قصير من أن تصبح مرشحة بشكل جيد، تراهنت أنا وستيفن هو كينج؛ لقد راهن على أنه ليس ثقبًا أسود، وراهن على أنه كذلك. شعرت كارولي وينشتاين -التي تزوجتها بعد عقد من هذا الرهان- بالخوف من الرهان (مجلة ينتهوس بالنسبة إليّ إذا فزت، ومجلة برايفت آي لستيفن إذا فاز). وكذلك كان

إخوتي وأمي. لكن لم يكن عليهم أن يقلقوا من أنني سأفوز بالفعل باشتراك البنتهاوس (أو هكذا اعتقدت في الثمانينيات)؛ كانت معلوماتنا حول طبيعة Cyg X-1 تتحسن ببطء شديد. بحلول عام 1990، من وجهة نظري، كان من الممكن أن نكون واثقين بنسبة 95٪ فقط بأنه ثقب أسود، وما زلنا غير واثقين بما يكفي ليعترف ستيفن. من الواضح أن ستيفن قرأ الأدلة بشكل مختلف. في وقت متأخر من إحدى الليالي في يونيو 1990، بينما كنت في موسكو أعمل على بحث مع زملائي السوفييت، اقتحم ستيفن وحاشية من العائلة والمرضات والأصدقاء مكتبي في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، ووجدوا الرهان المؤطر، وكتبوا مذكرة امتياز عليه مع التحقق من صحة بصمة ستيفن.



Whereas Stephen Hawking has such a large investment in General Relativity and Black Holes and desires an insurance policy, and whereas Kip Thorne likes to live dangerously without an insurance policy,

Therefore be it resolved that Stephen Hawking gets 1 year's subscription to "Fenthouse" as against Kip Thorne's wages of a 4-year subscription to "Private Eye", that Cygnus X-1 does not contain a black hole of mass above the Chandrasekhar limit.

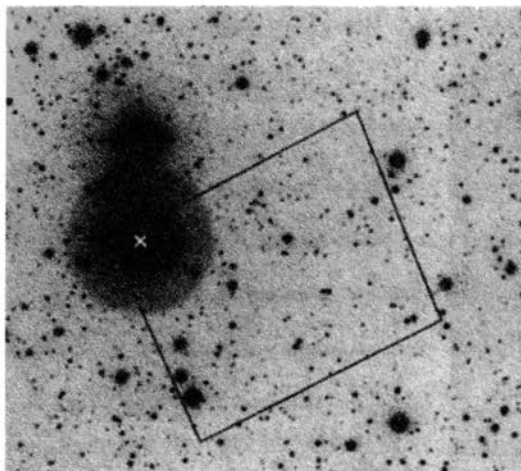
Witnessed this tenth day of December 1974
Hawking Amythos Werner J.

على اليمين: الرهان بيني وبين ستيفن هو كينج حول ما إذا كان الدجاجة س-1 ثقبًا أسود. على اليسار: هو كينج يحاضر في جامعة جنوب كاليفورنيا في يونيو 1990، قبل ساعتين فقط من اقتحام مكتبي والتوقيع على رهانا. [صورة هو كينج مقدمة من إيرين فيريتك، جامعة جنوب كاليفورنيا].

الدليل على أن Cyg X-1 يحتوي على ثقب أسود هو من النوع الذي تصوره زيلدوفيش ونوفيكوف عندما اقترحا طريقة البحث: Cyg X-1 عبارة عن نجم ثنائي مكون من نجم ساطع بصريًا ومظلم بالأشعة السينية يدور حول رفيق ساطع بالأشعة السينية ومظلم بصريًا، وقد وزن الرفيق للتأكد من أنه أثقل من أن يكون نجمًا نيوترونيًا، وبالتالي من المحتمل أن يكون ثقبًا أسود.

لم تطور الأدلة على أن هذه هي طبيعة eyg X-1 بسهولة. لقد تطلب الأمر جهداً تعاونياً وضخماً وعالمياً، نفّذه في الستينيات والسبعينيات، مئات من علماء الفيزياء التجريبية، وعلماء الفيزياء الفلكية النظرية، وعلماء الفلك الرصدي.

كان الفيزيائيون التجريبيون أشخاصاً مثل هربرت فريدمان، وستيوارت بوير، وإدوارد بيرام، وتالبوت تشب، الذين اكتشفوا eyg X-1 في رحلة صاروخية في عام 1964؛ وهارفي تانانباوم، وإدوين كيلوج، وهربرت جورسكي، وستيفن موراي، وإيثان شرير، وريكاردو جياكوني، الذين استخدموا أوهورو في عام 1971 لإنتاج مربع خطأ بحجم دقيقتين قوسيتين لموضع Cyg X-1 (الشكل 8.7)؛ والعديد من الآخرين الذين اكتشفوا ودرسوا التقلبات العنيفة والفوضوية للأشعة السينية وطاقاتها، وهي التقلبات التي يتوقعها المرء من الغاز الساخن المضطرب حول الثقب الأسود.



8.7 على اليسار: طبعة سلبية لصورة التقطها التلسكوب البصري الذي يبلغ طوله 5 أمتار (200 بوصة) في جبل بالومار بواسطة جيروم كريستيان في عام 1971. يوضح المستطيل الأسود مربع الخطأ الذي تشير بيانات أوهورو لعام 1971 إلى أن الدجاجة س-1 يقع فيه. تشير علامة X البيضاء إلى موقع التوهج الراديوي، الذي قاسته التلسكوبات الراديوية، والذي تزامن مع تغير مفاجئ في الأشعة السينية الصادرة عن Cyg X-1. يتزامن x مع النجم البصري HOE 226868، وبالتالي يعرفه على أنه رفيق ثنائي لـ Cyg X-1. وفي عام 1978 أكد التلسكوب أينشتاين هذا التحديد بواسطة تلسكوب الأشعة السينية؛ انظر الشكل 8.6 g. على اليمين: تصور فني لـ Cyg X-1 و HDE 226868، بناءً على جميع البيانات البصرية والأشعة السينية. [على اليسار: الصورة مقدمة من الدكتور جيروم كريستيان، مرصد كارنيجي؛ على اليمين: لوحة لفينكتور جي كيلبي، مقدمة من جمعية ناشيونال جيوغرافيك].

كان علماء الفلك الذين ساهموا في الجهود العالمية أشخاصًا مثل روبرت هيلمنج، وكام ويد، ولوك بريس، وجورج مايلي، الذين اكتشفوا في عام 1971 توهجًا من موجات الراديو في مربع خطأ Cyg X-1 الخاص بأوهورو، بالتزامن مع تغير ضخّم قاسه أوهورو. في الأشعة السينية لـ Cyg X-1، وبالتالي تحديد موقع Cyg X-1 في حدود ثانية واحدة من القوس (الشكلان 8.6 d و 8.7)؛ لويز ويبستر، وبول موردين، وتشارلز بولتون، الذين اكتشفوا باستخدام التلسكوبات البصرية أن النجم البصري HDE 226868، في موقع التوهج الراديوي، يدور حول نجم مصاحب ضخم ومظلم بصريًا ولكنه ساطع بالأشعة السينية (Cyg X-1). ومائة أو نحو ذلك من علماء الفلك البصريين الآخرين الذين أجروا قياسات مضنية لـ HDE 226868 والنجوم الأخرى المجاورة له، وهي قياسات حاسمة لتجنب المخاطر الشديدة في تقدير كتلة Cyg X-1.

وكان من بين علماء الفيزياء الفلكية النظرية الذين ساهموا في هذا الجهد أشخاص مثل زيلدوفيش ونوفيكوف، الذين اقترحوا طريقة البحث: بوهدان باتشينسكي، وبورام أفني، وجون باهكال، الذين طوروا طرقًا معقدة ولكن يمكن الاعتماد عليها للتحليل على مخاطر التقدير الشامل؛ وجيفري بوربيدج وكيفن برنجرست، اللذان أدركا أن الغاز الساخن الذي ينبعث من الأشعة السينية يجب أن يشكّل قرصًا حول الثقب؛ ونيكولاي شاكورا، ورشيد سونيايف، وجيمس برينجل، ومارتن ريس، وجيري أوستريكر، وآخرون عديدون، طوروا نماذج نظرية مفصلة للغاز الذي ينبعث من الأشعة السينية وقرصه، للمقارنة مع ملاحظات الأشعة السينية.

بحلول عام 1974، أدى هذا الجهد الهائل، بثقة تصل إلى 80٪ تقريبًا، إلى صورة Cyg X-1 والنجم المرافق له HDE 226868، والتي تظهر في رسم فني في النصف الأيمن من الشكل 8.7. لقد كانت مجرد صورة من النوع الذي تصوره زيلدوفيش ونوفيكوف، ولكن بتفاصيل أكبر بكثير: الثقب الأسود الموجود في مركز Cyg X-1 له كتلة أكبر بالتأكيد من 3 شمس، وربما أكبر من 7 شمس، ومن المحتمل أكثر أنها نحو 16؛ من المحتمل أن تكون لرفيقه HDE 226868 الساطع بصريًا والمظلم بالأشعة السينية كتلة أكبر من 20 شمسًا وعلى الأرجح نحو 33، ونصف قطره أكبر بنحو 20 مرة من الشمس؛ وتبلغ المسافة من سطح النجم إلى الثقب نحو 20 نصف قطر شمسي (14 مليون كيلومتر)؛ والثنائي يبعد نحو 6000 سنة ضوئية عن الأرض. Cyg X-1 هو ثاني

ألمع جسم في سماء الأشعة السينية؛ HDE 226868، على الرغم من أنه شديد السطوع مقارنة بمعظم النجوم التي يمكن رؤيتها بواسطة تلسكوب كبير، فإنه معتم جدًا بحيث لا يمكن رؤيته بالعين المجردة.

في العقدتين اللذين أعقبا عام 1974، زادت ثقتنا بهذه الصورة لـ Cyg X-1 من نحو 80 بالمائة إلى 95 بالمائة. (هذه تقديراتي الشخصية). ثقتنا ليست 100٪ لأنه، على الرغم من الجهود الهائلة، لم يعثر حتى الآن على أي دليل واضح على وجود ثقب أسود في Cyg X-1. ولا توجد إشارة، في الأشعة السينية أو الضوء، تصرخ في وجه علماء الفلك قائلة بشكل جلي واضح: «لقد جئت من ثقب أسود». لا يزال من الممكن ابتكار تفسيرات أخرى غير الثقوب السوداء لجميع البيانات الرصدية، على الرغم من أن هذه التفسيرات ملتوية للغاية لدرجة أن القليل من علماء الفلك يأخذونها على محمل الجد.

على النقيض من ذلك، تنتج بعض النجوم النيوترونية، التي تسمى النجوم النابضة، صرخة واضحة جلية: «أنا نجم نيوتروني»: فالأشعة السينية، أو في بعض الحالات موجات الراديو، تأتي في شكل نبضات حادة مؤقتة بدقة شديدة. ويكون التوقيت دقيقًا، في بعض الحالات، مثل دقة أفضل ساعاتنا الذرية. لا يمكن تفسير هذه النبضات إلا على أنها ناتجة عن أشعة من سطح نجم نيوتروني مشرق بالإشعاع وتنارجح بالقرب من الأرض في أثناء دوران النجم، وهو ما يشبه منارة ضوئية دوارة في مطار أو في منارة. لماذا هذا هو التفسير الوحيد الممكن؟ مثل هذا التوقيت الدقيق لا يمكن أن يأتي إلا من دوران جسم ضخم بقصور ذاتي هائل، وبالتالي مقاومة هائلة للقوى غير المنتظمة التي من شأنها أن تجعل التوقيت غير منتظم. من بين جميع الأجسام الضخمة التي تصورتها عقول علماء الفيزياء الفلكية، فقط النجوم النيوترونية والثقوب السوداء يمكنهما الدوران بمعدلات هائلة (مئات الدورات في الثانية) بالنسبة إلى (مقارنة بـ) بعض النجوم النابضة؛ والنجوم النيوترونية فقط، وليس الثقوب السوداء، هي التي يمكنها إنتاج أشعة دوارة، لأن الثقوب السوداء لا يمكن أن تحتوي على «شعر». (أي مصدر لمثل هذا الإشعاع، متصل بأفق الثقب، سيكون مثلاً لنوع «الشعر» الذي لا يستطيع الثقب الأسود التعلق به¹).

لقد فكر علماء الفلك في البحث في Cyg X-1 لمدة عشرين عامًا عن توقيع ثقب أسود بشكل لا يقبل الشك، مشابهًا لنبضات النجم النابض، ولكن من دون جدوى. ومن الأمثلة على مثل هذا التوقيع (ذلك الذي اقترحه رشيد سونيايف، عضو فريق زيلدوفيش

في عام 1972) نبضات إشعاعية تشبه النجم النابض، ينتجها شعاع متأرجح ينشأ في كتلة متماسكة من الغاز تدور حول الثقب. إذا كانت الكتلة قريبة من الثقب وحافظت على تماسكها لعدة مدارات ثم بدأت أخيرًا في الغوص في الأفق، فإن تفاصيل الفاصل الزمني المتغير تدريجيًا بين النبضات قد توفر توقيعا واضحا لا يقبل الشك: «أنا ثقب أسود». لسوء الحظ، لم يشاهد مثل هذا التوقيع من قبل. يبدو أن هناك عدة أسباب:

(1) يتحرك الغاز الساخن المنبعث من الأشعة السينية حول الثقب الأسود بشكل مضطرب وفوضوي لدرجة أن الكتل المتماسكة قد تتماسك معًا لمدار واحد فقط أو عدد قليل من المدارات، وليس لعدد كبير.

(2) إذا تمكنت بعض الكتل من التماسك معًا لفترة طويلة وإصدار توقيع الثقب الأسود، فمن الواضح أن الأشعة السينية المضطربة الصادرة عن بقية الغاز المضطرب تدفن توقيعها.

(3) إذا كان Cyg X-1 ثقبًا أسود بالفعل، فإن عمليات المحاكاة الرياضية تظهر أن معظم الأشعة السينية يجب أن تأتي من أماكن بعيدة خارج أفقه - من أطوال محيط حرج تبلغ 10 مرات تقريبًا أو أكثر، حيث يوجد حجم أكبر بكثير يمكن منه الخروج. يمكن أن تنبعث الأشعة السينية بالقرب من الأفق. وعلى مثل هذه المسافات الكبيرة من الثقب، تكون تنبؤات الجاذبية الخاصة بالنسبية العامة ونظرية نيوتن للجاذبية متماثلة تقريبًا، لذلك إذا كانت هناك نبضات من كتل تدور حولها، فإنها لن تحمل توقيعًا محددًا بقوة للثقب الأسود.

ولأسباب مشابهة كهذه، قد لا يتمكن علماء الفلك أبدًا من العثور على أي نوع من العلامات المحددة للثقب الأسود في أي موجات كهرومغناطيسية تنتج بالقرب من الثقب الأسود. ولحسن الحظ، فإن التوقعات ممتازة بالنسبة إلى نوع مختلف تمامًا من بصمات الثقب الأسود: نوع يحمله إشعاع الجاذبية. وسنعود إلى هذا في الفصل العاشر.

تزامن العصر الذهبي لأبحاث الثقوب السوداء النظرية (الفصل السابع) مع البحث الرصدي عن الثقوب السوداء واكتشاف Cyg X-1 وفك رموز طبيعته. وبالتالي، ربما كان المرء يتوقع أن يلعب الشباب الذين سيطروا على العصر الذهبي (بنروز، وهوكينج،

ونوفيكوف، وكارتر، وإسرائيل، وبريس، وتيوكولسكي، وبريس، وآخرون) أدوارًا رئيسية في البحث عن الثقب الأسود. ليس بهذا الشكل، باستثناء نوفيكوف. إن المواهب والمعرفة التي طورها هؤلاء الشباب، والاكتشافات الرائعة التي كانوا يقومون بها حول اللف المحوري للثقب الأسود، والنفض، وانعدام الشعر، لم تكن ذات صلة بالبحث وفك رموز Cyg X-1. ربما كان الأمر مختلفًا لو كان لدى Cyg X-1 توقيع ثقب أسود لا يقبل الشك. ولكن لم يكن هناك أي شيء.

يُطلق على هؤلاء الشباب وغيرهم من علماء الفيزياء النظرية أحيانًا اسم النسبيين، لأنهم يقضون الكثير من الوقت في العمل مع قوانين النسبية العامة. كان المنظرون الذين ساهموا في البحث (زيلدوفيش، وبازينسكي، وسونيايف، وريس، وآخرون) من سلالة مختلفة تمامًا، يُطلق عليهم علماء الفيزياء الفلكية. بالنسبة إلى البحث، كان هؤلاء الفيزيائيون الفلكيون بحاجة إلى إتقان قدر ضئيل فقط من النسبية العامة، وهو ما يكفي ليكونوا واثقين بأن الزمكان المنحني ليس له أي صلة على الإطلاق، وأن وصف فيزياء نيوتن للجاذبية سيكون كافيًا تمامًا لنمذجة جرم سماوي مثل Cyg X-1. ومع ذلك، فقد كانوا بحاجة إلى كميات هائلة من المعرفة الأخرى، المعرفة التي تعد جزءًا من مجموعة الأدوات القياسية لعالم الفيزياء الفلكية. لقد احتاجوا إلى إتقان المعرفة الفلكية الواسعة حول أنظمة النجوم الثنائية، وحول هياكل وتطورات وأطياف النجوم المصاحبة للثقوب السوداء المرشحة، وحول احمرار ضوء النجوم بسبب الغبار بين-النجوم -وهي أداة رئيسية في تحديد المسافة إلى Cyg X-1. كما أنهم بحاجة إلى أن يكونوا خبراء في قضايا مثل تدفق الغاز الساخن، وموجات الصدمة التي تتشكل عندما تصطدم تيارات الغاز الساخن، والاضطراب في الغاز، وقوى الاحتكاك في الغاز الناجمة عن الاضطراب والمجالات المغناطيسية الفوضوية، والانكسار العنيف وإعادة توصيل الغاز، وخطوط المجال المغناطيسي، وتكوين الأشعة السينية في الغاز الساخن، وانتشار الأشعة السينية عبر الغاز، وغير ذلك الكثير. قليل من الناس يمكن أن يتقنوا كل هذا، وفي الوقت نفسه، يتقنون الرياضيات المعقدة للزمكان المنحني. أدت القيود البشرية إلى حدوث انقسام في مجتمع الباحثين. إما أن تكون متخصصًا في الفيزياء النظرية للثقوب السوداء، فتستنتج من النسبية العامة الخصائص التي يجب أن تمتلكها الثقوب السوداء، وإما أنك متخصص في الفيزياء الفلكية للأنظمة الثنائية والغاز الساخن الذي يسقط على الثقوب السوداء

والإشعاع الناتج عن الغاز. فأنت إما أن تكون نسبياً (عالمًا في النسبية) وإما أن تكون عالمًا في الفيزياء الفلكية.

وقد حاول البعض منا أن يكون كليهما، ولكن بنجاح متواضع فقط. كانت لزيلدوفيش -عالم الفيزياء الفلكية البارِع- رؤى جديدة بين الحين والآخر حول أساسيات الثقوب السوداء. لقد حاولت، باعتباري عالمًا نسبياً موهوبًا إلى حد ما، بناء نماذج نسبية عامة لتدفق الغاز بالقرب من الثقب الأسود في Cyg X-1، لكن زيلدوفيش لم يفهم النسبية بعمق، ولم أفهم المعرفة الفلكية جيدًا. كان حاجز العبور هائلًا. من بين جميع الباحثين الذين عرفتهم في العصر الذهبي، لم يكن هناك سوى نوفيكوف وتشاندراسخار اللذين كانت لهما قدم واحدة راسخة في الفيزياء الفلكية والأخرى في النسبية.

واجه الفيزيائيون التجريبيون مثل جياكوني، الذين صمموا وأطلقوا أجهزة الكشف عن الأشعة السينية والأقمار الصناعية، حاجزًا مماثلًا. ولكن كان هناك اختلاف. لم تكن هناك حاجة إلى النسبيين في البحث عن الثقوب السوداء، في حين كانت هناك حاجة إلى علماء الفيزياء التجريبية. لم يتمكن علماء الفلك الرصدي وعلماء الفيزياء الفلكية، بإتقانهم لأدوات فهم الثنائيات وتدفق الغاز وانتشار الأشعة السينية، من فعل أي شيء حتى قدّم لهم الفيزيائيون التجريبيون بيانات مفصلة عن الأشعة السينية. حاول علماء الفيزياء التجريبية في كثير من الأحيان فك رموز ما تقوله بياناتهم الخاصة عن تدفق الغاز والثقب الأسود المحتمل الذي ينتجه، قبل تسليم البيانات إلى علماء الفلك وعلماء الفيزياء الفلكية، ولكن بنجاح متواضع فقط. وقد شكرهم علماء الفلك وعلماء الفيزياء الفلكية بلطف شديد، وأخذوا البيانات، ثم فسروها بطرقهم الخاصة الأكثر تطورًا وموثوقية.

إن اعتماد علماء الفلك وعلماء الفيزياء الفلكية على علماء الفيزياء التجريبية ليس سوى واحد من العديد من الاعتمادات المتبادلة التي كانت حاسمة للنجاح في البحث عن الثقوب السوداء. وفي الواقع، كان النجاح نتاج جهود مشتركة ومتراصة بذلتها ستة مجتمعات مختلفة من الناس. ولعب كل مجتمع دورًا أساسيًا. واستنتج النسبيون، باستخدام قوانين النسبية العامة، أن الثقوب السوداء لا بد أن تكون موجودة. اقترح علماء الفيزياء الفلكية طريقة البحث وقدموا إرشادات مهمة في عدة خطوات على طول الطريق. حدد علماء الفلك الرصدي HDE 226868، رفيق Cyg X-1؛ لقد استخدموا خطوطاً طيفية متغيرة بشكل دوري لوزن Cyg X-1؛ وقد جمعوا البيانات الرصدية الأخرى بشكل موسع

لتأكيد تقديرهم لوزنه. ابتكر علماء الفيزياء التجريبية الأدوات والتقنيات التي مكّنت من البحث عن نجوم الأشعة السينية، وقاموا بالبحث الذي حدد Cyg X-1. أنشأ المهندسون والمديرون في وكالة ناسا الصواريخ والمركبات الفضائية التي حملت أجهزة الكشف عن الأشعة السينية إلى مدار الأرض. وليس أقلها أهمية أن دافعي الضرائب الأمريكيين قدموا الأموال، عدة مئات الملايين من الدولارات، للصواريخ والمركبات الفضائية وكواشف الأشعة السينية وتلسكوبات الأشعة السينية، ورواتب المهندسين والمديرين والعلماء الذين عملوا مع الولايات المتحدة.

وبفضل هذا العمل الجماعي الرائع، أصبحنا الآن، في التسعينيات، متأكدين بنسبة 100٪ تقريبًا من أن الثقوب السوداء موجودة ليس فقط في Cyg X-1، ولكن أيضًا في عدد من الثنائيات الأخرى في مجرتنا.

1. الفصل السابع. وزع شعر المجال الكهربائي للثقب الأسود المشحون بالتساوي حول محور لف الثقب، وبالتالي لا يمكن أن ينتج شعاعًا مركّزًا.

الفصل التاسع: الصدفة

والذي فيه أجبر الفلكيون على استنتاج، من دون أي تنبؤ قبلي،
أن الثقوب السوداء أثقل بملايين المرات من الشمس وتأوي قلب
المجرات (بنسبة كبيرة)

المجرات الراديوية

لو أكد أي شخص في عام 1962 (عندما كان علماء الفيزياء النظرية قد بدأوا للتو في قبول مفهوم الثقب الأسود)، أن الكون يحتوي على ثقوب سوداء عملاقة، أثقل بملايين أو مليارات المرات من الشمس، لكان علماء الفلك قد ضحكوا. ومع ذلك، فإن علماء الفلك ظلوا يرصدون مثل هذه الثقوب العملاقة منذ عام 1939، باستخدام موجات الراديو، من دون أن يعرفوا، أو هكذا نشك بقوة اليوم.

موجات الراديو هي عكس الأشعة السينية. الأشعة السينية هي موجات كهرومغناطيسية ذات أطوال موجية قصيرة للغاية، وعادةً ما تكون أقصر بـ 10000 مرة من الطول الموجي للضوء (الشكل P.2 في المقدمة). موجات الراديو هي أيضًا كهرومغناطيسية، لكن لها أطوال موجية طويلة، عادةً ما تكون بضعة أمتار بين قمة الموجة إلى قمة الموجة التالية، وهي أطول بمليون مرة من الطول الموجي للضوء. كما أن الأشعة السينية وموجات الراديو متضادتان أيضًا من حيث ازدواجية الموجة/الجسيم (الإطار 4.1) - ميل الموجات الكهرومغناطيسية إلى التصرف أحيانًا كموجة وأحيانًا كجسيم (فوتون). تتصرف الأشعة السينية عادةً مثل الجسيمات ذات الطاقة العالية (الفوتونات)، وبالتالي تُكتشف بسهولة أكبر باستخدام عدادات جيجر، حيث تصطدم فوتونات الأشعة السينية بالذرات، مما يؤدي إلى طرد الإلكترونات منها (الفصل الثامن). تتصرف موجات الراديو دائمًا تقريبًا مثل موجات القوى الكهربائية والمغناطيسية، وبالتالي تُكتشف بسهولة باستخدام هوائيات سلكية أو معدنية حيث تدفع القوة الكهربائية المتذبذبة للموجات الإلكترونية لأعلى ولأسفل، وبالتالي إنشاء إشارات متذبذبة في جهاز استقبال راديو متصل بالهوائي.

اكتشف موجات الراديو الكونية (موجات الراديو القادمة من خارج الأرض) بالصدفة عام 1932 كارل جانسكي، وهو مهندس راديو في مختبرات بيل للهاتف في هولمديل، نيو جيرسي. بعد تخرجه حديثاً في الكلية، كلف جانسكي بمهمة التعرف على الضوضاء التي ابتليت بها المكالمات الهاتفية لأوروبا. في تلك الأيام، عبرت المكالمات الهاتفية المحيط الأطلسي عن طريق البث الراديوي، لذلك بنى جانسكي هوائي راديو خاصاً، مصنوعاً من مجموعة طويلة من الأنابيب المعدنية، للبحث عن مصادر الراديو الساكن (الشكل 9.1 a). وسرعان ما اكتشف أن معظم الكهرباء الساكنة جاءت من العواصف الرعدية، ولكن عندما اختفت العواصف، بقي هناك صوت ساكن خافت وهسهسة. بحلول عام 1935 كان قد حدد مصدر الهسهسة. لقد أتت في الغالب من المناطق الوسطى لمجرتنا درب التبانة. لما كان منتصف المجرة ظاهراً في السماء، كانت الهسهسة قوية؛ وعندما غاصت تحت الأفق، ضعفت الهسهسة لكنها لم تختف تماماً.

كان هذا اكتشافاً مذهلاً. كل من فكر في موجات الراديو الكونية توقع أن تكون الشمس هي المصدر الأكثر إشعاعاً لموجات الراديو في السماء، تماماً كما هي مصدر الضوء الأكثر سطوعاً. بعد كل شيء، الشمس أقرب إلينا بمليار (10^9) مرة من معظم النجوم الأخرى في درب التبانة، لذلك يجب أن تكون موجات الراديو الخاصة بها نحو $10^{12} = 10^9 \times 10^9$ مرة أكثر سطوعاً من تلك الصادرة عن النجوم الأخرى. نظراً لوجود 10^{12} نجم فقط في مجرتنا، يجب أن تكون الشمس أكثر سطوعاً من جميع النجوم الأخرى مجتمعة بعامل يقارب $10^6 = 10^{18}/10^{12}$ أي مليون. كيف يمكن أن تفشل هذه الحجة؟ كيف يمكن لموجات الراديو القادمة من المناطق المركزية البعيدة في درب التبانة أن تكون أكثر سطوعاً من تلك القادمة من الشمس القريبة؟

وبقدر ما قد يكون هذا اللغز مدهشاً، فإنه من المدهش أكثر، عند النظر إلى الماضي، أن علماء الفلك لم يعيروه أي اهتمام تقريباً. في الواقع، على الرغم من الدعاية الواسعة التي قامت بها شركة بيل للهاتف، يبدو أن اثنين فقط من علماء الفلك أبدوا بعض الاهتمام باكتشاف جانسكي. لقد كان محكوماً عليه بالنسيان تقريباً بسبب نفس النزعة الفلكية المحافظة التي واجهها تشاندراسخار بادعاءاته بأنه لا يوجد قزم أبيض يمكن أن يكون أثقل من 1.4 شمس (الفصل الرابع).

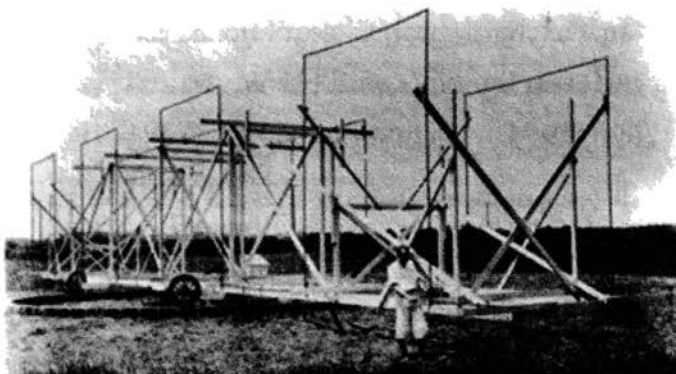
كان الاستثناءان لهذا النقص العام في الاهتمام هما طالب الدراسات العليا، جيسي جرينشتاين، والمحاضر فريد وييل، في قسم علم الفلك بجامعة هارفارد. أظهر جرينشتاين

وويل، في أثناء تأملهما في اكتشاف جانسكي، أنه إذا كانت الأفكار الحالية حول كيفية توليد موجات الراديو الكونية صحيحة، فمن المستحيل لمجرتنا درب التبانة أن تنتج موجات راديو قوية كما كان جانسكي يراها. وعلى الرغم من هذه الاستحالة الواضحة، صدق جرينشتاين وويل ملاحظات جانسكي؛ كانا على يقين من أن المشكلة تكمن في نظرية الفيزياء الفلكية، وليست مشكلة جانسكي. ولكن مع عدم وجود أي تلميحات حول أين الخطأ الذي تشير إليه النظرية، وبما أنه، كما يتذكر جرينشتاين، «لم أقابل قط أي شخص آخر [في الثلاثينيات] لديه أي اهتمام بالموضوع، ولا عالم فلك واحد»، فقد حوّل انتباههما إلى أشياء أخرى.

بحلول عام 1935 (في الوقت الذي اخترع فيه زيفكي مفهوم النجم النيوتروني؛ الفصل الخامس)، تعلم جانسكي كل شيء عن هسهسة المجرة التي سيسمح له الهوائي البدائي الذي صممه باكتشافها. وفي سعيه لمعرفة المزيد، اقترح على مختبرات بيل للهواتف بناء أول تلسكوب راديوي حقيقي في العالم: وعاء معدني ضخم يبلغ قطره 100 قدم (30 مترًا)، والذي من شأنه أن يعكس موجات الراديو الواردة إلى هوائي الراديو وجهاز الاستقبال. بنفس الطريقة التي يعكس بها التلسكوب البصري الضوء من مرآته إلى العدسة العينية أو لوحة التصوير الفوتوجرافي. رفضت بير وقراطية شركة بيل الاقتراح. ولم يكن مربحًا. قَبِلَ جانسكي، الموظف الجيد، بالأمر الواقع. لقد تخلّى عن دراسته للسماء، وفي ظل اقتراب الحرب العالمية الثانية، حوّل جهوده نحو اتصالات الموجات الراديوية ذات الأطوال الموجية الأقصر.

لم يكن العلماء المحترفون مهتمين باكتشاف جانسكي، لدرجة أن الشخص الوحيد الذي بنى تلسكوبًا راديويًا خلال العقد التالي كان جروت ريبير، وهو أعزب غريب الأطوار ومشغل راديو في ويتون، إلينوي، ذو رقم اتصال W9GFZ. بعد أن قرأ ريبير هسهسة راديو جانسكي في مجلة علم الفلك للجماهير، شرع في دراسة تفاصيلها. حصل ريبير على تعليم ضعيف جدًا في العلوم، لكن ذلك لم يكن مهمًا. ما يهم هو تدريبه الجيد في الهندسة وخطه العملي القوي. باستخدام براعة هائلة ومدخراته المتواضعة، صمم وبنى يديه، في الفناء الخلفي لمنزل والدته، أول تلسكوب راديوي في العالم، وهو طبق قطره 30 قدمًا (أي 9 أمتار) (الشكل 9.1 c)؛ وعن طريقه صنع خرائط راديوية للسماء (الشكل 9.1 d). في خرائطه، يمكن للمرء أن يرى بوضوح ليس فقط المنطقة الوسطى من مجرتنا درب التبانة، ولكن يرى أيضًا مصدرين راديويين آخرين، أطلق عليهما فيما بعد Cas A - A و Cyg A للإشارة إلى «مصادر الراديو الأكثر سطوعًا»، و Cas و Cyg في إشارة إلى «الأبراج» الدجاجة

وذاث الكرسي. أربعة عقود من المسح الفلكي ستُظهر في نهاية المطاف، وباحتمال كبير، أن Cyg A والعديد من مصادر الراديو الأخرى التي اكتُشفت في السنوات التالية ستكون مدعومة بثقوب سوداء عملاقة.

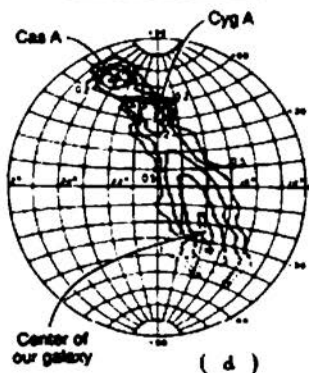


(أ)

(ب)



(ج)



9.1 (a) كارل جانسكي والهوائي الذي اكتشف به موجات الراديو الكونية في عام 1932 من مجرتنا. (b) جروت رير، عام 1940 تقريباً. (c) أول تلسكوب راديوي في العالم، أنشأه رير في الفناء الخلفي لمنزل والدته في ويتون، إلينوي. (d) خريطة لموجات الراديو من السماء أنشأها رير باستخدام التلسكوب الراديوي في الفناء الخلفي له. [(a) تصوير مختبرات بيل للهاتف، من باب الإهداء AIP Emilio Segrè Visual Archives؛ (b) و (c) إهداء من جروت رير؛ (d) مقتبس من رير (1944).]

ستكون قصة هذا المسح هي الموضوع المركزي لهذا الفصل. وقد اخترت أن أخصص فصلاً كاملاً للقصة لعدة أسباب:

أولاً، توضح هذه القصة نمطاً من الاكتشافات الفلكية يختلف تماماً عن ذلك الموضح في الفصل الثامن. في الفصل الثامن، اقترح زيلدوفيش ونوفيكوف طريقة ملموسة للبحث عن الثقوب السوداء؛ وقد نفَّذ علماء الفيزياء التجريبية، وعلماء الفلك، وعلماء الفيزياء الفلكية هذه الطريقة؛ وقد أتت بثمارها. في هذا الفصل، رصد ريبير بالفعل ثقوباً سوداء عملاقة في عام 1939، قبل وقت طويل من تفكير أي شخص في البحث عنها، ولكن سيستغرق الأمر أربعين عاماً حتى تجبر أدلة الرصد المتزايدة علماء الفلك على استنتاج مفاده أن الثقوب السوداء هي ما يرونها بالفعل.

ثانياً، يوضح الفصل الثامن قدرات علماء الفيزياء الفلكية والنسبية؛ ويبين هذا الفصل حدودها. كان متوقعاً أن تكون أنواع الثقوب السوداء المكتشفة في الفصل الثامن موجودة قبل ربع قرن من قيام أي شخص بالبحث عنها. كانت تلك الثقوب هي ثقوب أوبنهايمر-سنايدر: وهي أثقل من الشمس بعدة مرات، ونشأت نتيجة انفجار النجوم الثقيلة. وعلى النقيض من ذلك، لم يتنبأ أي منظر بوجود الثقوب السوداء العملاقة المذكورة في هذا الفصل. إنها أثقل بآلاف أو ملايين المرات من أي نجم رآه أي عالم فلكي في السماء، لذا لا يمكن أن تنشأ عن طريق انفجار مثل هذه النجوم. وأي منظر كان سيتنبأ بهذه الثقوب العملاقة كان سيشوّه سمعته العلمية. وكان اكتشاف هذه الثقوب بمثابة الصدفة في أنقى صورها.

ثالثاً، ستوضح قصة الاكتشاف في هذا الفصل، بشكل أكثر وضوحاً من الفصل الثامن، التفاعلات المعقدة والترابط بين أربعة مجتمعات من العلماء: النسبيون، وعلماء الفيزياء الفلكية، وعلماء الفلك، وعلماء الفيزياء التجريبية.

رابعاً، سيتبين، في وقت لاحق من هذا الفصل، أن اللف المحوري وطاقة اللف للثقوب السوداء العملاقة يلعبان أدواراً مركزية في تفسير موجات الراديو المرصودة. وعلى النقيض من ذلك، لم يكن اللف المحوري للثقب ذا أهمية بالنسبة إلى الخصائص المرصودة للثقوب ذات الحجم الصغير في الفصل الثامن.

في عام 1940، بعد أن أجرى أول مسح لا سلكي للسماء، كتب ريبير بعناية وصفاً تقنياً لتلسكوبه وقياساته وخريطته، وأرسله بالبريد إلى سابرامانين تشاندراسخار -الذي كان في هذا

الوقت محرراً المجلة الفيزياء الفلكية في الجامعة. أرسله كذلك إلى مرصدير كس في شيكاغو، على شاطئ بحيرة جنيف في ولاية فايسكونسن. وزَّع تشاندراسخار مخطوطة ريبير الرائعة بين علماء الفلك من أسرة العاملين بمرصدير كس. كان تشاندراسخار مرتباً من المخطوطة ومتشككاً في هذا الهاوي المجهول تماماً، توجه العديد من علماء الفلك إلى ويتون، إلينوي، لإلقاء نظرة على جهازه. لقد عادوا متأثرين. وافق تشاندراسخار على نشر الورقة.

قام جيسي جرينشتاين، الذي أصبح عالماً فلكياً في ير كس بعد إكمال دراساته العليا في جامعة هارفارد، بعدد من الرحلات إلى ويتون خلال السنوات القليلة التالية وأصبح صديقاً مقرباً لريبير. ويصف جرينشتاين ريبير بأنه «المخترع الأمريكي المثالي. لو لم يكن مهتماً بعلم الفلك الراديوي، لكان قد جمع مليون دولار».

وبسبب حماسه لأبحاث ريبير، حاول جرينشتاين، بعد بضع سنوات، نقله إلى جامعة شيكاغو. يتذكر جرينشتاين قائلاً: «لم تكن الجامعة ترغب في إنفاق سنت واحد على علم الفلك الراديوي». لكن أوتو شتروف، مدير مرصدير كس بالجامعة، وافق على تعيين بحثي بشرط أن تأتي الأموال اللازمة لدفع رواتب ريبير ودعم أبحاثه من واشنطن. ومع ذلك، يقول جرينشتاين: «كان ريبير شخصاً مستقلاً بحدّة». ورفض أن يشرح للبيروقراطيين بأي تفاصيل كيف ستفق الأموال المخصصة للتلسكوبات الجديدة. فشلت الصفقة.

في هذه الأثناء، كانت الحرب العالمية الثانية قد انتهت، وكان العلماء الذين قاموا بعمل تقني في المجهود الحربي يبحثون عن تحديات جديدة. وكان من بينهم فيزيائيون تجريبيون طوروا راداراً لتتبع طائرات العدو في أثناء الحرب. نظرًا لأن الرادار ليس سوى موجات راديو يرسلها جهاز إرسال يشبه التلسكوب الراديوي، وترتد من الطائرة، وتعود مرة أخرى إلى جهاز الإرسال، فقد كان هؤلاء الفيزيائيون التجريبيون في وضع مثالي لإعطاء الحياة للمجال الجديد لعلم الفلك الراديوي - وكان بعضهم حريصاً على ذلك؛ وكانت التحديات التقنية كبيرة، وكانت المكاسب الفكرية واعدة. ومن بين العديد من الذين جربوا ذلك - سرعان ما سيطرت ثلاث فرق على هذا المجال: فريق برنارد لوفيل في بنك جودريل / جامعة مانشستر في إنجلترا؛ وفريق مارتن رايل في جامعة كامبريدج في إنجلترا؛ وفريق أنشأه باوسي وجون بولتون في أستراليا. أما في أمريكا فلم يكن هناك سوى القليل من الجهد الملحوظ. واصل جروت ريبير أبحاثه في علم الفلك الراديوي بمفرده تقريباً.

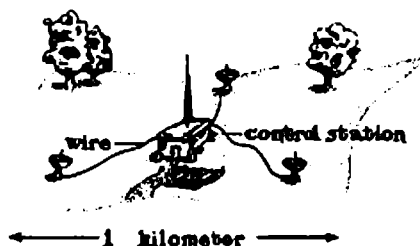
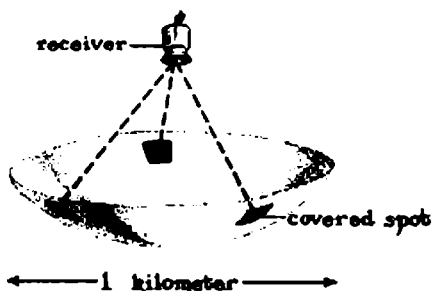
لم يول علماء الفلك البصري (علماء الفلك الذين يدرسون السماء بالضوء، وهم النوع الوحيد من علماء الفلك الموجود في تلك الأيام) سوى القليل من الاهتمام للنشاط المحموم لعلماء الفيزياء التجريبية. وسيظلون غير مهتمين حتى تتمكن التلسكوبات الراديوية من قياس تموضع المصدر في السماء بدقة كافية لتحديد الجرم السماوي الذي ينبعث منه الضوء والمسؤول عن موجات الراديو. وهذا يتطلب تحسیناً بمقدار 100 كسر من الدقة مقارنة بما حققه روبر؛ أي تحسين بمقدار 100 كسر في الدقة التي قاس بها مواقع مصادر الراديو وأحجامها وأشكالها.

كان مثل هذا التحسن أمراً صعباً. يمكن للتلسكوب البصري، أو حتى العين البشرية المجردة، تحقيق دقة عالية بسهولة، لأن الموجات التي يعمل بها (الضوء) لها أطوال موجية قصيرة جداً، أقل من 10-6 متر. وعلى النقيض من ذلك، لا تستطيع الأذن البشرية أن تميز بدقة شديدة الاتجاه الذي يأتي منه الصوت، لأن الموجات الصوتية لها أطوال موجية طويلة، تصل إلى متر تقريباً. وبالمثل، فإن موجات الراديو، بأطوالها الموجية التي يبلغ حجمها متراً، تعطي دقة وضوح ضعيفة، إلا إذا كان التلسكوب المستخدم أكبر بكثير من المتر. كان تلسكوب روبر أكبر قليلاً؛ ومن ثم، كانت دقته متواضعة. لتحقيق تحسين بمقدار 100 كسر من الدقة، سيتطلب الأمر تلسكوباً أكبر 100 مرة؛ أي ما يقرب من كيلومتر واحد في الحجم، و/أو استخدام موجات راديو ذات طول موجي أقصر، على سبيل المثال، بضعة سنتيمترات بدلاً من متر واحد.

لقد حقق الفيزيائيون التجريبيون هذا التحسن بمقدار 100 كسر في عام 1949، ليس بالقوة الغاشمة، ولكن بالذكاء. يمكن فهم مفتاح ذكائهم من خلال القياس على شيء بسيط ومألوف للغاية. (هذا مجرد تشبيه؛ وهو في الواقع غش بسيط، لكنه يعطي انطباعاً عن الفكرة العامة). نحن البشر نستطيع أن نرى الأبعاد الثلاثية للعالم من حولنا باستخدام عيني فقط، وليس أكثر. فالعين اليسرى ترى حول الشيء قليلاً من الجانب الأيسر، والعين اليمنى ترى حوله قليلاً من الجانب الأيمن. إذا قلنا رؤوسنا على الجانبين يمكننا أن نرى حول الجزء العلوي من الجسم قليلاً وحول الجزء السفلي منه قليلاً؛ وإذا أردنا أن نحرك عيوننا بعيداً عن بعضها (كما هي الحال في الواقع مع زوج من الكاميرات التي تصنع أفلاماً ثلاثية الأبعاد بأبعاد ثلاثية مبالغ فيها)، فسنرى أبعد إلى حد ما حول الجسم. ومع ذلك، فإن رؤيتنا ثلاثية الأبعاد لن تتحسن بشكل كبير من خلال وجود عدد كبير من العيون، التي تغطي كامل جبهات وجوهنا.

سنرى الأشياء بشكل أكثر سطوعاً بكثير باستخدام كل تلك العيون الإضافية (ستكون لدينا حساسية أعلى)، ولكننا لن نحصل إلا على نسبة متواضعة من الدقة ثلاثية الأبعاد.

الآن سيكون التلسكوب الراديوي الضخم الذي يبلغ طوله كيلومتراً واحداً (النصف الأيسر من الشكل 9.2) يشبه إلى حدٍّ ما وجهنا المغطى بالعيون. وستكون التلسكوب من وعاء بحجم كيلومتر واحد مغطى بالمعدن يعكس ويركز موجات الراديو على هوائي سلبي وجهاز استقبال راديو. إذا أردنا إزالة المعدن من كل مكان باستثناء بعض البقع المنتشرة على نطاق واسع فوق الوعاء، فسيكون ذلك مثل إزالة معظم تلك العيون الزائدة من وجهنا، والاحتفاظ بالقليل منها فقط. في كلتا الحالتين، هناك خسارة متواضعة في الدقة، ولكن هناك خسارة كبيرة في الحساسية. أكثر ما أراده الفيزيائيون التجريبيون هو تحسين الدقة (أرادوا معرفة مصدر موجات الراديو وما هي أشكال مصادر الراديو)، وليس حساسية محسنة (وليس القدرة على رؤية المزيد من مصادر الراديو الخافتة - على الأقل ليس الآن). لذلك، كانوا بحاجة فقط إلى وعاء متقطع، وليس وعاء مغطى بالكامل.



9.2 مبدأ مقياس التداخل الراديوي. على اليسار: من أجل تحقيق دقة زاوية جيدة، يرغب المرء في الحصول على تلسكوب ضخم يبلغ طوله كيلومتراً واحداً. ومع ذلك، سيكون كافياً أن تكون بعض البقع (الصلبة) الموجودة على الوعاء العاكس لموجة الراديو مغطاة بالفعل بالمعدن وتنعكس. على اليمين: ليس من الضروري أن تتركز موجات الراديو المنعكسة من تلك النقاط على هوائي وجهاز استقبال راديو في مركز الوعاء الضخم. بدلاً من ذلك، يمكن لكل نقطة تركيز موجاتها على هوائياتها وجهاز الاستقبال الخاص بها، ويمكن بعد ذلك نقل الإشارات الراديوية الناتجة عن طريق الأسلاك من جميع أجهزة الاستقبال إلى محطة الاستقبال المركزية، حيث تدمج بنفس الطريقة التي كانت ستتم بها لو أن هناك جهاز استقبال تلسكوب ضخمًا. والنتيجة هي شبكة من التلسكوبات الراديوية الصغيرة ذات مخرجات مرتبطة ومجمعة، ومقياس تداخل راديوي.

كانت إحدى الطرق العملية لصنع مثل هذا الوعاء المتقطع هي بناء شبكة من التلسكوبات الراديوية الصغيرة المتصلة بواسطة أسلاك بمحطة استقبال راديو مركزية (النصف الأيمن من الشكل 9.2). كان كل تلسكوب صغير بمثابة بقعة معدنية على الوعاء الكبير، وكانت الأسلاك التي تحمل إشارة الراديو لكل تلسكوب صغير مثل أشعة الراديو المنعكسة من نقاط الوعاء الكبير، وكانت محطة الاستقبال المركزية التي تجمع الإشارات من الأسلاك مثل وعاء كبير، الهوائي والمستقبل، اللذان يجمعان الحزم من بقع الوعاء. سميت هذه الشبكات من التلسكوبات الصغيرة، وهي محور جهود الفيزيائيين التجريبيين، بمقاييس التداخل الراديوي، لأن المبدأ الكامن وراء تشغيلها كان قياس التداخل: من خلال «تداخل» مخرجات التلسكوبات الصغيرة بعضها مع بعض بطريقة سنلتي بها في الإطار 10.3 من الفصل العاشر، تُنشئ محطة الاستقبال المركزية خريطة راديوية أو صورة للسماء.

خلال أواخر الأربعينيات والخمسينيات وحتى الستينيات، تنافست الفرق الثلاث من علماء الفيزياء التجريبية (بانك جودريل، وكامبريدج، وأستراليا) بعضها مع بعض في بناء مقاييس تداخل راديوي أكبر حجمًا وأكثر تطورًا، مع دقة تتحسن باستمرار. أول معيار حاسم، وهو التحسين بمقدار 100 كسر اللازم للبدء في إثارة الاهتمام بين علماء الفلك البصري، جاء في عام 1949، عندما أنتج جون بولتون وجوردون ستانلي وبروس سلي من الفريق الأسترالي مربعات خطأ بحجم 10 دقائق قوسية لمواضع عدد من المصادر الراديوية؛ أي عندما حددوا مناطق بحجم 10 دقائق قوسية في السماء كان يجب أن تقع فيها مصادر الراديو. (عشر دقائق قوسية تساوي ثلث قطر الشمس كما تُرى من الأرض، وبالتالي فهي دقة أقل بكثير مما يمكن أن تحققه العين البشرية مع الضوء، ولكنها دقة جيدة بشكل ملحوظ عند العمل مع موجات الراديو). فُحصت باستخدام التلسكوبات البصرية، وبعضها، بما في ذلك Cyg A، لم يُظهر أي شيء مشرق ذي ملاحظة خاصة؛ وستكون هناك حاجة إلى دقة راديوية أكبر للكشف عن أيٍّ من العدد الكبير من الأجسام المعتمدة بصريًا في مربعات الخطأ هذه قد يكون المصدر الحقيقي لموجات الراديو. ومع ذلك، في ثلاثة من مربعات الخطأ، كان هناك جسم بصري ساطع بشكل غير عادي: بقايا مستعر أعظم قديم، ومجرتان بعيدتان.

وبقدر ما كان من الصعب على علماء الفيزياء الفلكية تفسير موجات الراديو التي اكتشفها جانسكي والمنبعثة من مجرتنا، كان من الأصعب فهم كيف يمكن للمجرات البعيدة أن تبعث مثل هذه الإشارات الراديوية القوية. إن حقيقة أن بعض مصادر الراديو

الأكثر سطوعًا في السماء قد تكون أجسامًا بعيدة جدًا هو شيء لا يصدق العقل (على الرغم من أنه سيتبين في النهاية أنه صحيح). لذلك، بدا رهانًا جيدًا (ولكن أولئك الذين راهنوا سيخسرون) أن الإشارات الراديوية لكل مربع خطأ لم تكن قادمة من المجرة البعيدة، بل من أيٍّ من العدد الكبير من النجوم المعتمدة بصريًا ولكنها قريبة في مربع الخطأ. فقط الدقة الأعلى هي التي يمكنها أن تقرر على وجه اليقين. تقدم الفيزيائيون التجريبيون للأمام، وبدأ عدد قليل من علماء الفلك البصري في المراقبة بنصف عين، مع اهتمام طفيف.

بحلول صيف عام 1951، حقق فريق رايل في كامبريدج تحسنًا إضافيًا في الدقة بمقدار 10 كسور، واستخدمه جراهام سميث، وهو طالب دراسات عليا في رايل، لإنتاج مربع خطأ ذي دقة واحدة لـ Cyg A - وهو صندوق صغير بما يكفي يمكن أن يحتوي على مائة أو نحو ذلك من الأجسام البصرية (الأشياء التي تُرى بالضوء). أرسل سميث أفضل تموضع لتخمينه ومربع الأخطاء الذي صممه بالبريد إلى عالم الفلك البصري الشهير والتر بادى في معهد كارنيجي في باسادينا. (كان بادى هو الرجل الذي حدد قبل سبعة عشر عامًا، مع زفيكي، المستعرات العظمى واقترح أن النجوم النيوترونية هي التي تزودها بالطاقة - الفصل الخامس). كان معهد كارنيجي يمتلك التلسكوب البصري الذي يبلغ قطره 2.5 متر (100 بوصة) على جبل ويلسون، حتى وقت قريب كان الأكبر في العالم؛ كان قد انتهى للتو معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، في باسادينا، من بناء التلسكوب الأكبر حجمًا الذي يبلغ قطره 5 أمتار (200 بوصة) على جبل بالومار؛ وشارك علماء الفلك في كارنيجي ومعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا التلسكوبات الخاصة بهم، بعضهم مع بعض. في جلسة الرصد التالية المقررة على بالومار 5 أمتار (الشكل 9.3 a)، صوّر بادى مربع الخطأ في السماء حيث قال سميث إن فيه يتموضع Cyg A.

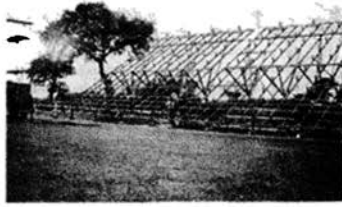
(هذه البقعة في السماء، مثل معظم البقع، لم تُفحص من قبل من خلال تلسكوب بصري كبير). وعندما التقط بادى الصورة، لم يصدق عينه. هناك، في صندوق الخطأ، ثمة شيء لم يسبق له مثيل. ويبدو أن ثمة مجرتين تصطدم إحدهما بالأخرى (مركز الشكل 9.3 d). (نعلم الآن، بفضل عمليات الرصد التي تمت بواسطة تلسكوبات الأشعة تحت الحمراء في الثمانينيات، أن اصطدام المجرة كان مجرد وهم بصري. Cyg A هي في الواقع مجرة واحدة بها شريط من الغبار يمر عبر وجهها. ويمتص الغبار الضوء بهذه الطريقة. لجعل المجرة الواحدة تبدو كمجرتين متصادمتين). النظام بأكمله، المجرة المركزية بالإضافة إلى المصدر الراديوي، سيُسمى فيما بعد بالمجرة الراديوية.

كان علماء الفلك مقتنعين لمدة عامين بأن موجات الراديو تنتج عن اصطدام مجري. ثم، في عام 1953، جاءت مفاجأة أخرى. درس كل من روجر كليفتون جينيسون وميرنال كومار داس جوبتا من فريق بنك جودريل التابع لفريق لوفيل Cyg A باستخدام مقياس تداخل جديد يتكون من تلسكوبين، أحدهما مثبت على الأرض والآخر يتحرك حول ضواحي المدينة على متن شاحنة لتغطية عدد من التلسكوبات واحدًا تلو الآخر. «بقع» على «طبق» تلسكوب وهمي مساحته 4 كيلومترات مربعة (انظر النصف الأيسر من الشكل 9.2)، باستخدام مقياس التداخل الجديد هذا (الأشكال 9.3 c, b)، اكتشفوا أن موجات الراديو Cyg A لم تكن قادمة من «المجرات المتصادمة»، بل من منطقتين عملاقتين مستطيلتين تقريبًا من الفضاء، يبلغ حجمهما نحو 200000 سنة ضوئية ويبعد بعضهما عن بعض 200 ألف سنة ضوئية، على طرفي «المجرات المتصادمة». تظهر هذه المناطق التي ينبعث منها الراديو، أو الفصوص كما يطلق عليها، على شكل مستطيلات في الشكل 9.3 d، بالإضافة إلى الصورة الضوئية التي التقطها بادي لـ «المجرات المتصادمة». تظهر في الشكل أيضًا خريطة أكثر تفصيلًا للانبعاثات الراديوية للفصوص، أنشئت بعد ستة عشر عامًا باستخدام مقياس تداخل أكثر تطورًا؛ تظهر هذه الخريطة على شكل خطوط رفيعة تُظهر سطوع البث الراديوي بنفس الطريقة التي تُظهر بها خطوط الخريطة الطبوغرافية ارتفاع الأرض. تؤكد هذه الخطوط الاستنتاج الذي توصل إليه عام 1953 بأن موجات الراديو تأتي من فصوص غازية عملاقة على جانبي «المجرات المتصادمة». كيف يمكن تزويد هذين الفصين الهائلين بالطاقة من خلال ثقب أسود عملاق واحد؟

ستصبح قضية رئيسية لاحقًا في هذا الفصل.

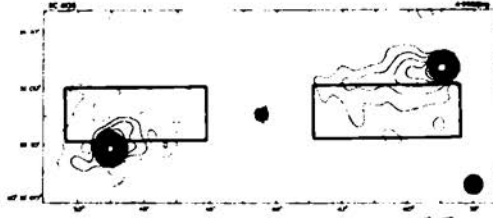


(a)



(b)

(c)



(d)

9.3 اكتشاف أن Cyg A هي مجرة راديوية بعيدة: (a) التلسكوب البصري ذو الـ 5 أمتار الذي استخدمه بادي في عام 1951 لاكتشاف أن Cyg A مرتبطة بما يبدو بأنه مجرتان متصادمتان. (لا) مقياس التداخل الراديوي في بنك جودريل الذي استخدمه جينسون وداس جوبتا في عام 1953 لإظهار أن موجات الراديو تأتي من فصين عملاقين خارج المجرات المتصادمة. يظهر هنا هوائيا مقياس التداخل (كل منهما عبارة عن مجموعة من الأسلاك على إطار خشبي) متجاورين. وفي القياسات، وضع أحدهما على شاحنة وتنقل في ضواحي المدينة، بينما بقي الآخر في الخلف، مستريحاً على الأرض. (c) جينسون وداس جوبتا، يفحصان بيانات الراديو في غرفة التحكم بمقياس التداخل الخاص بهما. (d) الفصان العملاقان للانبعاث الراديوي (المستطيلان) كما أظهرتهما قياسات عام 1953، مع الصورة الضوئية التي التقطها بادي «للمجرات المتصادمة». تظهر أيضاً في (d) خريطة كفاية عالية الدقة للانبعاثات الراديوية للفصوص (ملاح صلبة رفيعة)، أنتجتها مجموعة رايل في كامبريدج عام 1969. [(a) بإذن من مرصد بالومار / معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا؛ (b) و (c) بإذن من مختبرات علم الفلك الراديوي نوفيلد، جامعة ماننستر؛ (d) مقتبس من ميتون ورايل (1969)، وبادي ومينكوفسكي (1954)، وجينسون وداس جوبتا (1953)].

كانت هذه الاكتشافات مذهلة بما يكفي لإثارة اهتمام قوي بين علماء الفلك البصري بعد طول انتظار. لم يعد جيسي جرينشتاين الشخص الوحيد الذي يولي اهتمامًا جديدًا.

بالنسبة إلى جرينشتاين نفسه، كانت هذه الاكتشافات بمثابة القشة التي قصمت ظهر البعير. بعد أن فشلوا في الدخول إلى مجال الراديو مباشرة بعد الحرب، أصبح الأمريكيون الآن متفرجين على أعظم ثورة ضربت علم الفلك منذ أن اخترع جاليليو التلسكوب البصري. لقد جُنيت ثمار الثورة في بريطانيا وأستراليا، وليس في أمريكا.

جرينشتاين الآن أستاذ في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا. لقد جاء به إلى هناك من يركس لبناء برنامج لعلم الفلك حول التلسكوب البصري الجديد الذي يبلغ طوله 5 أمتار، لذا بطبيعة الحال، ذهب الآن إلى لي دوبريدج، رئيس معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، وحث معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا على بناء مقياس تداخل راديوي لاستخدامه جنبًا إلى جنب مع تلسكوب الـ 5 أمتار في استكشاف المجرات البعيدة. كان دوبريدج، الذي كان مديرًا لجهود الرادار الأمريكية في أثناء الحرب، متعاطفًا ولكنه حذر. ولدفع دوبريدج إلى العمل، نظم جرينشتاين مؤتمرًا دوليًا حول مستقبل علم الفلك الراديوي في واشنطن العاصمة يومي 5 و6 يناير 1954.

في واشنطن، بعد أن وصف ممثلو المراسد الراديوية البريطانية والأسترالية اكتشافاتهم الرائعة، طرح جرينشتاين سؤاله: هل يجب على الولايات المتحدة أن تستمر كأرض قاحلة لعلم الفلك الراديوي؟
الجواب كان واضحًا.

وبدعم قوي من مؤسسة العلوم الوطنية، شرع الفيزيائيون والمهندسون وعلماء الفلك الأمريكيون في برنامج مكثف لبناء مرصد وطني لعلم الفلك الراديوي في جرينبانك، فيرجينيا الغربية؛ ووافق دوبريدج على اقتراح جرينشتاين لإنشاء مقياس تداخل راديوي متطور من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا في أوينز فالي، كاليفورنيا، جنوب شرق متنزه يوسمايت الوطني. نظرًا لعدم امتلاك أي شخص في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا الخبرة اللازمة لبناء مثل هذا الجهاز، فقد أغرى جرينشتاين جون بولتون من أستراليا لقيادة الجهود.

النجوم الزائفة

بحلول أواخر الخمسينيات من القرن الماضي، كان الأمريكيون قادرين على المنافسة. كانت التلسكوبات الراديوية في جرينبانك تدخل حيز التشغيل، وفي معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، كان توم ماثيوز وبيير يوجين مالتبي وألان موفيت على مقياس التداخل الراديوي الجديد في أوينز فالي يعملون إلى جوار بادى وجرينشتاين وآخرين على التلسكوب البصري بالومار الذي يبلغ طوله 5 أمتار، لاكتشاف أعداد كبيرة من المجرات الراديوية ودراستها.

في عام 1960، جلبت هذه الجهود مفاجأة أخرى: تلقى توم ماثيوز في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا كلمة من هنري بالمر مفادها أنه وفقاً لقياسات بنك جودريل، فإن مصدر الراديو المسمى 3C48 (المصدر الثامن والأربعون في الإصدار الثالث من الكتالوج الذي أنشأته مجموعة رايل في كامبريدج) كان بالغ الصغر، لا يزيد قطره على ثانية قوسية (2000/1 من الحجم الزاوي للشمس). لذا فإن المصدر الصغير جداً سيكون شيئاً جديداً تماماً. ومع ذلك، لم يتمكن بالمر وزملاؤه في بنك جودريل من توفير مربع خطأ محكم لموقع المصدر. أنتج ماثيوز، في عمل رائع جميل باستخدام مقياس التداخل الراديوي الجديد من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، مربع خطأ بحجم 5 ثوانٍ فقط من القوس، وأعطاه لألان سانداج، عالم الفلك البصري في معهد كارنيجي في باسادينا. في رحلته الرصدية التالية باستخدام التلسكوب البصري الذي يبلغ طوله 5 أمتار، التقط سانداج صورة فوتوجرافية تتمحور حول صندوق خطأ ماثيوز، ولم يجد، لدهشته الكبيرة، مجرة، بل وجد نقطة ضوء زرقاء واحدة؛ بدت وكأنها نجم. يتذكر سانداج قائلاً: «لقد أخذت صورة طيف في الليلة التالية، وكان أغرب طيف رأيته على الإطلاق». لم تكن الأطوال الموجية للخطوط الطيفية تشبه على الإطلاق تلك الخاصة بالنجوم أو أي غاز ساخن صُنع على الأرض على الإطلاق؛ لقد كانت مختلفة عن أي شيء واجهه علماء الفلك أو الفيزيائيون من قبل. لم يكن بإمكان سانداج أن يكون أي معنى على الإطلاق عن هذا الجرم السماوي الغريب.

وعلى مدار العامين التاليين، اكتُشفت ستة أجرام سماوية مماثلة بنفس الطريقة، وكل

منها محير مثل 3C 48. بدأ جميع علماء الفلك البصرية في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا و كارنيجي في تصويرها، والتقطوا الأطياف، وحاولوا فهم طبيعتها. كان ينبغي أن تكون الإجابة واضحة، لكنها لم تكن كذلك. سيطر الانغلاق العقلي. بدت هذه الأجسام الغربية تشبه النجوم إلى حد كبير لدرجة أن علماء الفلك ظلوا يحاولون تفسيرها على أنها نوع من النجوم في مجرتنا لم يسبق رؤيتها من قبل، لكن التفسيرات كانت ملتوية بشكل رهيب، ولم تكن قابلة للتصديق في الحقيقة.

كسر مارتن شميدت هذا الانغلاق العقلي، وهو عالم فلك هولندي يبلغ من العمر 32 عامًا، وكان قد انضم مؤخرًا إلى هيئة تدريس معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا. لقد ناضل لعدة أشهر لفهم الطيف الذي تُثَقِّط لـ 3C 273، وهو أحد الأجرام السماوية الغربية. في الخامس من فبراير عام 1963، وبينما كان جالسًا في مكتبه في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا يرسم بعناية الطيف المراد إدراجه في مخطوطة يكتبها، صدمه الجواب فجأة. كانت الخطوط الأربعة الأكثر سطوعًا في الطيف هي «خطوط بالمر» الأربعة القياسية التي ينتجها غاز الهيدروجين - وهي الأكثر شهرة بين جميع الخطوط الطيفية، وهي الخطوط الأولى التي تعلمها طلاب الفيزياء في الكلية في دوراتهم حول الميكانيكا الكمومية. ومع ذلك، فإن هذه الخطوط الأربعة لم تكن لها أطوالها الموجية المعتادة. لقد انزاح كل منها إلى اللون الأحمر بنسبة 16 بالمائة. يجب أن يكون 3C 273 جرمًا سماويًا يحتوي على كمية هائلة من غاز الهيدروجين ويتحرك بعيدًا عن الأرض بنسبة 16 ٪ من سرعة الضوء، وهي أسرع بكثير من أي نجم رآه أي عالم فلكي على الإطلاق.

طار شميدت إلى القاعة، وقابل جرينشتاين، ووصف اكتشافه بحماس. استدار جرينشتاين، وعاد إلى مكتبه، وأخرج طيفه لـ 3C 48، وحدث إليه لبعض الوقت. لم تكن خطوط بالمر موجودة عند أي انزياح نحو الأحمر، لكن الخطوط المنبعثة من المغنيسيوم والأكسجين والنيون كانت تحدث إلى وجهه، وكان لها انزياح أحمر بنسبة 37 بالمائة. كان 3C 48 جزيئًا على الأقل، عبارة عن كمية هائلة من الغاز الذي يحتوي على المغنيسيوم والأكسجين والنيون، ويتحرك بعيدًا عن الأرض بنحو 37 بالمائة من سرعة الضوء.

ما الذي كان ينتج هذه السرعات العالية؟ إذا كانت هذه الأجرام السماوية الغربية (التي ستُسمى لاحقًا بالنجوم الزائفة)، كما اعتقد الجميع، نوعًا من النجوم في مجرتنا درب التبانة، فلا بد أنها قُذفت من مكان ما، ربما من النواة المركزية لمجرة درب التبانة، بقوة

هائلة. كان هذا أمرًا لا يمكن تصديقه، كما أن الفحص الدقيق لأطياف النجوم الزائفة جعل الأمر يبدو مستبعدًا للغاية. البديل المعقول الوحيد، كما جادل جرينشتاين وشميدت (بشكل صحيح)، هو أن هذه النجوم الزائفة بعيدة جدًا في كوننا، وتبتعد عن الأرض بسرعة عالية نتيجة لتوسع الكون.



على اليسار: جيسي جرينشتاين مع رسم لتلسكوب بالومار البصري بطول 5 أمتار، كاليفورنيا. 1955. على اليمين: مارتن شميدت، مع أداة لقياس الأطياف صنعها التلسكوب ذو الـ 5 أمتار، كاليفورنيا. 1963. [بإذن من الأرشيف، معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا].

تذكر أن توسع الكون يشبه توسع سطح البالون في أثناء نفخه. إذا كان هناك عدد من النمل يقف على سطح البالون، فإن كل نملة سوف ترى كل النمل الآخر يبتعد عنها نتيجة تمدد البالون. كلما ابتعدت نملة أخرى، تمكنت النملة الأولى من رؤيتها تتحرك بشكل أسرع. وبالمثل، كلما كان الجسم بعيدًا عن الأرض، زادت سرعته عبر رؤيته من الأرض. نتيجة لتوسع الكون. بمعنى آخر، سرعة الجسم تتناسب طرديًا مع المسافة التي يقطعها. لذلك، باستخدام سرعات 3C273 و 3C48، تمكن شميدت وجرينشتاين من استنتاج المسافة بيننا وبينهما: مليارات سنة ضوئية و 4.5 مليار سنة ضوئية، على التوالي.

وكانت هذه مسافات هائلة، وهي تقريبًا أكبر المسافات المسجلة على الإطلاق. وهذا يعني أنه لكي تكون المجرتان 3C273 و3C48 ساطعتين كما تظهران في التلسكوب الذي يبلغ قطره 5 أمتار، فعليهما أن تشعا كميات هائلة من الطاقة: قوة أكبر 100 مرة من أكثر المجرات سطوعًا على الإطلاق.

في الواقع، كان 3C273 شديد السطوع لدرجة تصويره إلى جانب العديد من الأجسام الأخرى القريبة منه في السماء، أكثر من 2000 مرة منذ عام 1895 باستخدام تلسكوبات متواضعة الحجم. بعد أن علم هارلان سميث من جامعة تكساس عن اكتشاف شميدت، فحص بدقة هذا الكنز من الصور الفوتوجرافية، المحفوظ بعناية في جامعة هارفارد، واكتشف أن 3C273 كان يتقلب في السطوع خلال السبعين عامًا الماضية. لقد تغير ناتج الضوء بشكل كبير خلال فترات قصيرة تصل إلى شهر. وهذا يعني أن جزءًا كبيرًا من الضوء المنبعث من 3C273 يجب أن يأتي من منطقة أصغر من المسافة التي يقطعها الضوء في شهر واحد، أي أصغر من «شهر ضوئي» واحد. (إذا كانت المنطقة أكبر، فلن تكون هناك طريقة لأي قوة تتحرك بسرعة أقل من أو تساوي سرعة الضوء، يمكنها أن تجعل الغاز المنبعث يضيء أو يخفت في وقت واحد في حدود دقة شهر).

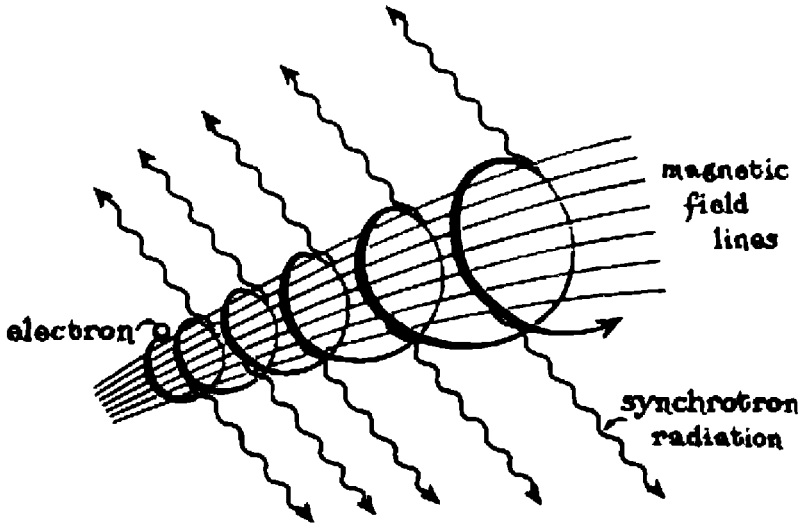
كان من الصعب للغاية تصديق الآثار المترتبة على ذلك. كان هذا النجم الزائف الغريب، 3C273، يلمع 100 مرة أسطع من ألمع المجرات في الكون، ولكن في حين أن المجرات تنتج ضوءها في مناطق يبلغ حجمها 100000 سنة ضوئية، فإن 3C273 تنتج ضوءها في منطقة أصغر قطرًا بمليون مرة على الأقل وأصغر حجمًا بـ 1018 مرة: شهر ضوئي فقط أو أقل. يجب أن يأتي الضوء من جسم غازي ضخم ومضغوط يسخنه محرك قوي للغاية. سيتبين في النهاية أن المحرك، بثقة عالية ولكن ليست كاملة، هو ثقب أسود عملاق، ولكن أقوى الأدلة على ذلك ستظهر بعد مرور خمسة عشر عامًا.

إذا كان تفسير جانسكي لموجات الراديو الصادرة عن مجرتنا درب التبانة أمرًا صعبًا، وتفسير موجات الراديو القادمة من المجرات الراديوية البعيدة أكثر صعوبة، فإن تفسير موجات الراديو الصادرة عن هذه النجوم الزائفة فائقة البعد سيكون منتهى الصعوبة.

اتضح أن الصعوبة كانت عبارة عن انغلاق عقلي شديد. افترض جيسي جرينشتاين وفريد ويبل وجميع علماء الفلك الآخرين في ثلاثينيات وأربعينيات القرن العشرين

أن موجات الراديو الكونية، مثل الضوء الصادر عن النجوم، تنبعث من اهتزاز الذرات والجزيئات والإلكترونات الناجم عن الحرارة. ولم يتمكن علماء الفلك في الثلاثينيات والأربعينيات من تصور أي طريقة أخرى للطبيعة لخلق موجات الراديو المرصودة، على الرغم من أن حساباتهم أظهرت بشكل لا جدال فيه أن هذه الطريقة لا يمكن أن تنجح.

ومع ذلك، كانت هناك طريقة أخرى معروفة لدى الفيزيائيين منذ أوائل القرن العشرين: عندما يصطدم إلكترون يتحرك بسرعة عالية بمجال مغناطيسي، فإن القوة المغناطيسية للمجال تعمل على تحويل حركة الإلكترون إلى دوامة. يضطر الإلكترون إلى الدوران حول خطوط المجال المغناطيسي فيستمر بهذه الحركة (الشكل 9.4)، وعندما يدور بشكل دوامي، فإنه يبعث إشعاعاً كهرومغناطيسياً. بدأ الفيزيائيون في الأربعينيات من القرن العشرين يطلقون على هذا الإشعاع اسم إشعاع سنكروتروني، لأنه ينتج عن طريق الإلكترونات المتصاعدة في مسرعات الجسيمات التي تسمى «السينكروترونات» والتي كانوا يبنونها في ذلك الوقت. ومن اللافت للنظر أنه في أربعينيات القرن العشرين، على الرغم من اهتمام الفيزيائيين الكبير بإشعاع السنكروترون، لم يُعره علماء الفلك أي اهتمام. سيطر الانغلاق العقلي لعلماء الفلك.



9.4 تنتج الموجات الراديوية الكونية بواسطة إلكترونات قريبة من سرعة الضوء والتي تلف وتدور في شكل الدوامة حول المجالات المغناطيسية. يجبر المجال المغناطيسي الإلكترون على التحرك في شكل الدوامة بدلاً من التحرك في خط مستقيم، وتنتج حركة الإلكترون في شكل دوامة موجات الراديو.

في عام 1950، كسر كارل أوتو كينيهيور في شيكاغو، وفيثالي لازاريفيتش جينزبرج في موسكو (هو نفسه جينزبرج الذي اخترع وقود LiD للقنبلة الهيدروجينية السوفيتية، والذي اكتشف أول إشارة إلى أن الثقوب السوداء ليس لها شعر²) هذا الانغلاق العقلي. بناءً على أفكار هانز ألفين ونيكولاي هيرلوفسون، اقترح كينيهيور وجينزبرج (بشكل صحيح) أن موجات راديو جانسكي القادمة من مجرتنا هي إشعاع سنكروتروني تنتجه إلكترونات قريبة من سرعة الضوء تتصاعد حول خطوط المجال المغناطيسي التي تملأ الفضاء بين-النجوم (الشكل 9.4).

وبعد بضع سنوات، عندما اكتشفت الفصوص الراديوية العملاقة التي تنبعث من المجرات الراديوية ومن ثم النجوم الزائفة، كان من الطبيعي (والصحيح) أن نستنتج أن موجات الراديو الخاصة بها تنتج أيضًا عن طريق الإلكترونات المتصاعدة حول خطوط المجال المغناطيسي. ومن خلال القوانين الفيزيائية التي تحكم مثل هذا التصاعد وخصائص موجات الراديو المرصودة، حسب جيفري بوربيدج -من جامعة كاليفورنيا في سان دييغو- مقدار الطاقة التي يجب أن يمتلكها المجال المغناطيسي للفصوص والإلكترونات عالية السرعة. إجابته المذهلة: في الحالات القصوى، يجب أن تحتوي الفصوص التي ينبعث منها الراديو على نفس القدر من الطاقة المغناطيسية والطاقة (الحركية) عالية السرعة التي يمكن أن يحصل عليها المرء عن طريق تحويل كتلة 10 ملايين (10^7) شمس إلى طاقة نقية مع كفاءة 100 بالمائة.

كانت الطاقة المطلوبة للنجوم الزائفة والمجرات الراديوية مذهلة للغاية لدرجة أنها أجبرت علماء الفيزياء الفلكية، في عام 1963، على فحص جميع مصادر الطاقة التي يمكن تصورها بحثًا عن تفسير.

ومن الواضح أن الطاقة الكيميائية (حرق البنزين، أو النفط، أو الفحم، أو الديناميت)، والتي تشكّل أساس الحضارة الإنسانية، غير كافية. لا تزيد الكفاءة الكيميائية لتحويل الكتلة إلى طاقة على جزء واحد في المليار (جزء واحد في 10^9). وبالتالي، فإن تنشيط الغاز الذي ينبعث من الراديو في النجم الزائف يتطلب $10^7 \times 10^9 = 10^{16}$ كتلة شمسية من الوقود الكيميائي؛ أي وقود أكبر بـ 100000 مرة من الوقود الموجود في مجرتنا درب التبانة بأكملها. بدا هذا غير معقول على الإطلاق.

إن الطاقة النووية، وهي أساس القنبلة الهيدروجينية وحرارة الشمس وضوءها، بدت هامشية فقط كوسيلة لإمداد النجوم الزائفة بالطاقة. تبلغ كفاءة الوقود النووي في تحويل الكتلة إلى طاقة نحو 1 ٪ (جزء واحد من 10^2)، لذا سيحتاج النجم الزائف إلى $10^2 \times 10^7 = 10^9$ (1 مليار) كتلة شمسية من الوقود النووي لتنشيط فصوصه الباعثة للراديو. وهذه المليار كتلة شمسية لن تكون كافية إلا إذا أُحرق وقودها النووي بالكامل وتحولت كل الطاقة الناتجة إلى مجالات مغناطيسية وطاقة حركية للإلكترونات عالية السرعة. يبدو أن الاحتراق الكامل والتحويل الكامل للطاقة أمر ذو احتمالية ضعيفة للغاية. حتى مع وجود الآلات المصممة بعناية، فإن أفضل ما يحققه البشر هو تحويل نسبة قليلة من طاقة الوقود إلى طاقة مفيدة وهو أمر نادر، والطبيعة من دون تصميمات دقيقة قد يكون أداؤها أسوأ. وهكذا، فإن 10 مليارات أو 100 مليار كتلة شمسية من الوقود النووي تبدو أكثر منطقية. الآن، هذه أقل من كتلة مجرة عملاقة، ولكن ليس أقل بكثير، ولم يكن من الواضح تمامًا كيف يمكن للطبيعة أن تحقق تحويل الطاقة النووية للوقود إلى طاقة مغناطيسية وحركية. وبالتالي، كان الوقود النووي أمرًا محتملاً، لكنه ليس وارد الحدوث.

يمكن أن تؤدي إبادة المادة بالمادة المضادة إلى تحويل الكتلة إلى طاقة بنسبة 100 ٪، لذا فإن إبادة 5 ملايين كتلة شمسية من المادة المضادة بـ 5 ملايين كتلة شمسية من المادة يمكن أن تلبّي احتياجات النجم الزائف من الطاقة. ومع ذلك، لا يوجد أي دليل على وجود أي مادة مضادة في كوننا، باستثناء الأجزاء الصغيرة التي أنشأها البشر بشكل صناعي في سرعات الجسيمات والأجزاء الصغيرة التي خلقتها الطبيعة في الاصطدامات بين جزيئات المادة. بالإضافة إلى ذلك، حتى لو دمرت الكثير من المادة والمادة المضادة في نجم زائف، فإن طاقة فنائهما ستتحول إلى أشعة جاما ذات طاقة عالية جدًا، وليس إلى طاقة مغناطيسية وطاقة حركية للإلكترونات. وهكذا، يبدو أن فناء المادة/المادة المضادة هو طريقة غير مُرضية على الإطلاق لتنشيط النجم الزائف.

بقي احتمال آخر: الجاذبية.

ومن الممكن أن يؤدي الانفجار الداخلي لنجم عادي ليشكل نجمًا نيوترونيًا أو ثقبًا أسود إلى تحويل 10 ٪ من كتلة النجم إلى طاقة مغناطيسية وحركية، على الرغم من عدم وضوح طريقة حدوث ذلك بشكل محدد. إذا تمكنت من القيام بذلك، فإن الانفجارات الداخلية لـ $10^7 \times 10^8 = 10^{15}$ (100 مليون) من النجوم العادية قد توفر طاقة للنجم زائف،

كما هي الحال مع الانفجار الداخلي لنجم واحد افتراضي فائق الكتلة أثقل من الشمس بـ 100 مليون مرة. [الفكرة الصحيحة هي أن الثقب الأسود العملاق الناتج عن الانفجار الداخلي لنجم فائق الكتلة قد يكون في حد ذاته المحرك الذي يغذي النجم الزائف، لم يخطر على بال أحد في عام 1963. ولم تكن الثقوب السوداء مفهومة جيدًا. لم يكن ويلر قد صاغ بعد عبارة «الثقب الأسود» (الفصل السادس). لم يدرك سالبير وزيلدوفيش بعد أن الغاز الذي يسقط باتجاه الثقب الأسود يمكن أن يسخن ويطلق إشعاعًا بكفاءة عالية (الفصل الثامن). لم يكن بنروز قد اكتشف بعد أن الثقب الأسود يمكنه تخزين ما يصل إلى 29 ٪ من كتلته كطاقة دورانية، ثم ينفثها (الفصل السابع). إن العصر الذهبي لأبحاث الثقوب السوداء لم يكن قد بدأ بعد].

إن فكرة انفجار نجم ليشكل ثقبًا أسود قد يؤدي إلى تنشيط النجوم الزائفة كانت خروجًا جذريًا عن التقليد. كانت هذه هي المرة الأولى في التاريخ التي يشعر فيها علماء الفلك وعلماء الفيزياء الفلكية بالحاجة إلى اللجوء إلى تأثيرات النسبية العامة لتفسير جرم سماوي ما تحت الرصد. في السابق، كان النسبيون يعيشون في عالم، وعلماء الفلك وعلماء الفيزياء الفلكية يعيشون في عالم آخر، وكانوا بالكاد يتواصلون. الآن أوشكت عزلتهم على الانتهاء.

لتعزيز الحوار بين النسبيين وعلماء الفلك وعلماء الفيزياء الفلكية، وتحفيز التقدم في دراسة النجوم الزائفة، عُقد مؤتمر ضم ثلاثمائة عالم في الفترة من 16 إلى 18 ديسمبر 1963، في دالاس، تكساس. وصف توماس جولد من جامعة كورنيل الوضع في خطاب ألقاه بعد العشاء في ندوة تكساس الأولى حول الفيزياء الفلكية النسبية، جزئيًا فقط بسخرية: «[سر النجوم الزائفة] يسمح للمرء أن يقترح أن النسبيين بعملهم المتطور ليسوا مجرد زخارف ثقافية رائعة ولكنهم قد يكونون في الواقع مفيدون للعلم! الجميع مسرورون: النسبيون الذين يشعرون أنهم موضع تقدير وأنهم خبراء في مجال لم يعرفوا بوجوده إلا بالكاد، وعلماء الفيزياء الفلكية لأنهم وسعوا مجالهم وإمبراطوريتهم، من خلال ضم موضوع آخر - النسبية العامة. كل هذا ممتع للغاية، لذا دعونا نأمل جميعًا أن نكون في الاتجاه الصحيح. كم سيصبح من العار أن نضطر إلى استبعاد كل النسبيين مرة أخرى!».

استمرت المحاضرات بشكل متواصل تقريبًا من الساعة 8:30 صباحًا حتى 6 مساءً مع

ساعة لتناول وجبة الغداء. ومن الساعة 6 مساءً حتى الساعة الثانية صباحاً تُخصص الوقت للمناقشات والحجج غير الرسمية. تسلل بين المحاضرات عرض تقديمي قصير مدته عشر دقائق ألقاه عالم الرياضيات النيوزيلندي الشاب روي كير، والذي لم يكن معروفًا للمشاركين الآخرين. كان كير قد اكتشف للتو حله لمعادلة مجال أينشتاين، وهو الحل الذي -بعد عقد من الزمن- سيتبين أنه يصف جميع خصائص الثقوب السوداء التي تلف حول محورها، بما في ذلك تخزينها وإطلاقها لطاقة الدوران (الفصلان السابع والحادي عشر)؛ كما سترى أدناه، الحل الذي سيصبح في النهاية أساسًا لتفسير طاقة النجوم الزائفة. ومع ذلك، في عام 1963، بدا الحل الذي قدمه كير لمعظم العلماء مجرد فضول رياضي؛ لم يكن أحد يعلم حتى أنه يصف الثقب الأسود، على الرغم من أن كير توقع أنه قد يعطي بطريقة ما نظرة ثاقبة على الانفجار الداخلي للنجوم الدوارة.

جاء علماء الفلك وعلماء الفيزياء الفلكية إلى دالاس لمناقشة النجوم الزائفة؛ لم يكونوا مهتمين على الإطلاق بموضوع كير الرياضي المستتر. لذلك، عندما نهض كير للتحديث، خرج الكثيرون من قاعة المحاضرات إلى الردهة ليتجادل بعضهم مع بعض حول نظرياتهم المفضلة عن النجوم الزائفة. وبقي آخرون، أقل تهذيبًا، جالسين في القاعة وتجادلوا همسًا. العديد من الباقيين اغتبنوا جهدًا غير مثمر لمعالجة عجزهم عن النوم بسبب النقاشات العلمية حتى وقت متأخر من الليل. ولم يستمع إلا عدد قليل من النسبيين باهتمام كبير.

كان هذا أكثر مما يمكن أن يتحملة أخيل باباييترو، أحد أبرز علماء النسبية في العالم. عندما انتهى كير، طلب باباييترو الكلمة، ووقف، وشرح بإحساس عميق أهمية إنجاز كير الفذ. لقد كان باباييترو يحاول لمدة ثلاثين عامًا إيجاد مثل هذا الحل لمعادلة أينشتاين، لكنه فشل، كما فشل العديد من النسبيين الآخرين. أو ما علماء الفلك وعلماء الفيزياء الفلكية برأسهم بأدب، وبعد ذلك، عندما بدأ المتحدث التالي في الحديث عن نظرية النجوم الزائفة، أعادوا تركيز انتباههم، وازدادت وتيرة الاجتماع.

شكلت الستينيات نقطة تحول في دراسة مصادر الراديو. في السابق، كان علماء الفلك الرصديون يهيمنون على الدراسة بالكامل؛ أي علماء الفلك البصري والفيزيائيون التجريبيون الذين يرصدون الراديو، والذين اندمجوا الآن في المجتمع الفلكي وأصبح يطلق عليهم علماء الفلك الراديوي. وعلى النقيض من ذلك، لم يقدم علماء الفيزياء

الفلكية النظرية سوى القليل، لأن عمليات الرصد الراديوي لم تكن مفصلة بعد بما يكفي لتوجيه نظرياتهم بشكل جيد. كانت مساهماتهم الوحيدة هي إدراك أن موجات الراديو تنتج بواسطة إلكترونات عالية السرعة تحلق حول خطوط المجال المغناطيسي في الفصوص العملاقة التي ينبعث منها الراديو، وحساباتهم لمقدار الطاقة المغناطيسية والحركية التي يستلزمها ذلك.

في ستينيات القرن العشرين، مع استمرار تحسن دقة التلسكوبات الراديوية وبدء عمليات الرصد البصري في الكشف عن ميزات جديدة للمصادر الراديوية (على سبيل المثال، الأحجام الصغيرة لقلوب النجوم الزائفة التي ينبعث منها الضوء)، أصبح هذا القدر المتزايد من المعلومات الكمومية بمثابة مادة أساسية لعقول علماء الفيزياء الفلكية ف البحث العلمي. ومن هذه المعلومات الغنية، أنتج علماء الفيزياء الفلكية العشرات من النماذج التفصيلية لشرح المجرات الراديوية والنجوم الزائفة، ثم دحضت بيانات الرصد المجمعة نماذجهم واحدًا تلو الآخر. أخيرًا، كانت هذه هي الطريقة التي من المفترض أن يعمل بها العلم!

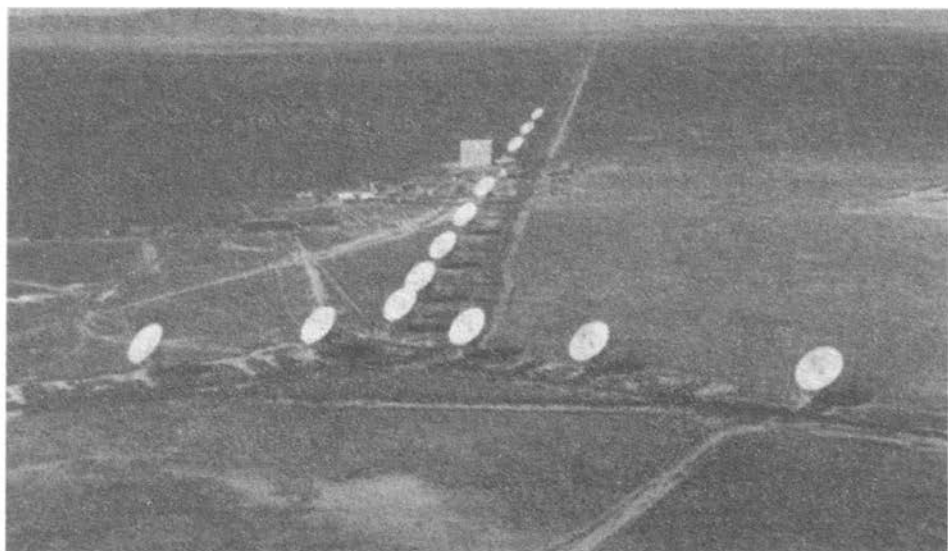
كانت إحدى المعلومات الرئيسية هي اكتشاف علماء الفلك الراديوي أن المجرات الراديوية تبعث موجات راديو ليس فقط من فصوصها المزدوجة العملاقة، واحدة على كل جانب من المجرة المركزية، ولكن أيضًا من قلب المجرة المركزية نفسها. في عام 1971، اقترحت على مارتن ريس -وهو طالب حديث لدى دينيس سياما في كامبريدج- فكرة جديدة جذريًا حول تشغيل الفصوص المزدوجة. ربما كان هناك محرك واحد في قلب المجرة مسؤولًا عن جميع موجات الراديو في المجرة. ربما كان هذا المحرك ينشط مباشرة الإلكترونات الباعثة للراديو والمجالات المغناطيسية في قلب المجرة، وربما كان يرسل أيضًا طاقة إلى الفصوص العملاقة، لتنشيط إلكتروناتها ومجالاتها، وربما كان هذا المحرك الموجود في قلب المجرات الراديوية من نفس النوع (مهما كان ذلك) الذي يزود النجوم الزائفة بالطاقة.

اشتبه ريس في البداية أن الحزم التي تحمل الطاقة من القلب إلى الفصوص كانت مصنوعة من موجات كهرومغناطيسية فائقة التردد. ومع ذلك، سرعان ما أوضحت الحسابات النظرية أن مثل هذه الأشعة الكهرومغناطيسية لا يمكنها اختراق الغاز بين-النجمي في المجرة، بصرف النظر عن مدى صعوبة محاولتها.

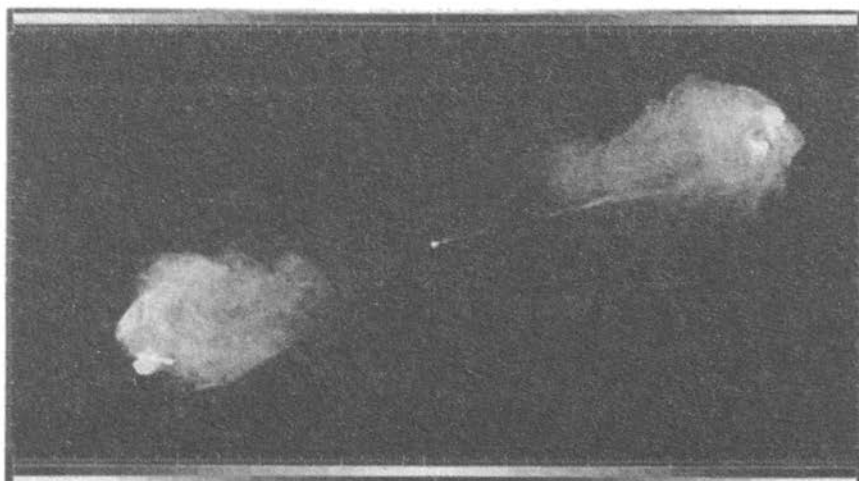
وكما هي الحال غالبًا، فإن فكرة ريس غير الصحيحة تمامًا حفزت فكرة صحيحة. أخذ الكولم لونجير، ومارتن رابل، وبيتر شوير في كامبريدج الفكرة وعدّلوها بطريقة بسيطة: لقد احتفظوا بأشعة ريس، لكنهم صنعوها من غاز ساخن ممغنط بدلاً من الموجات الكهرومغناطيسية. وسرعان ما وافق ريس على أن هذا النوع من نفاثات الغاز سيؤدي المهمة، وحسب مع تلميذه روجر بلاندفورد الخصائص التي يجب أن تتصف بها نفاثات الغاز.

بعد بضع سنوات، تأكد هذا التوقع، بأن الفصوص التي تنبعث منها موجات الراديو مدعومة بنفاثات الغاز الخارجة من محرك مركزي، بشكل مذهل باستخدام مقاييس التداخل الراديوي الجديدة الضخمة في بريطانيا وهولندا وأمريكا - وأبرزها VLA الأمريكية (المصفوفة فائقة الكبر) في سهول سانت أوغستين في نيو مكسيكو (الشكل 9.5). شاهدت مقاييس التداخل النفاثات، وكانت للنفاثات الخصائص المتوقعة بالضبط. لقد وصلت من قلب المجرة إلى الفصين، ويمكن رؤيتها حتى وهي تصطدم بالغاز في الفصين وتتباطأ حتى التوقف.

يستخدم VLA نفس تقنية «البقع على الوعاء» التي استخدمتها أجهزة قياس التداخل الراديوي في الأربعينيات والخمسينيات من القرن الماضي (الشكل 9.2)، لكن وعاءه أكبر بكثير فيستخدم عددًا أكبر من النقاط (العديد من التلسكوبات الراديوية المرتبطة). فهو يحقق دقة تصل إلى ثانية قوسية واحدة، وهو ما يعادل تقريبًا أفضل التلسكوبات البصرية في العالم - وهو إنجاز هائل عندما يفكر المرء في مدى بدائية أدوات جانسكي وريبر الأصلية قبل أربعين عامًا. لكن التحسينات لم تتوقف عند هذا الحد. بحلول أوائل الثمانينيات، أُنتجت صور لقلب المجرات الراديوية والنجوم الزائفة، بدقة أفضل 1000 مرة من التلسكوبات البصرية، بواسطة مقياس التداخل القاعدي فائق الطول (VLBI) المكون من تلسكوبات راديوية على جوانب متقابلة من القارة أو العالم. (تسلي مخرجات كل تلسكوب في VLBI على شريط مغناطيسي، بالإضافة إلى علامات زمنية من ساعة ذرية، ثم تشغل الأشرطة من جميع التلسكوبات على جهاز حاسوب حيث «تتداخل» بعضها مع بعض لتجميع الصور).



9.5 مقياس الن داخل الراديوي VLA في سهول سانت أوغسطين في نيو مكسيكو. [إهداء NRAO/AUI].



صورة للانبعاث الراديوي من المجرة الراديوية الدجاجة أ التقطت باستخدام VLA عن طريق بيرلي ودرابر، وكون. النفاثات التي تغذي فص الراديو الأيمن واضحة تمامًا؛ أما النفاثات التي تغذي الفص الأيسر فأكثر خفوتًا. لاحظ التحسن الهائل في دقة صورة الموجات الراديوية هذه مقارنة بخريطة الكفاف التي أعدها ريبير عام 1944 والتي لم تُظهر الفصوص المزدوجة على الإطلاق (الشكل 9.1 d)، ومع خريطة الراديو التي وضعها جينيسون وداس جويتا عام 1953 والتي بالكاد كشفت عن وجود الفصوص. (مستطيلان في الشكل 9.3 d)، ومع خريطة رايل الكنتورية لعام 1969 (الشكل 9.3 d). [إهداء

[NRAO/AUI]

أظهرت صور VLBI، في أوائل ثمانينيات القرن العشرين، أن النفاثات تمتد مباشرة لمسافة السنوات الضوئية القليلة إلى قلب المجرة أو النجم الزائف -وهي المنطقة نفسها التي يوجد فيها، في حالة بعض النجوم الزائفة مثل 3C273، نجم رائع ذو جسم مضيء باعث للضوء لا يزيد حجمه على شهر ضوئي. من المفترض أن المحرك المركزي موجود داخل الجسم الباعث للضوء، وهو لا يزود هذا الجسم بالطاقة فحسب، بل يزود أيضًا النفاثات التي تغذي بعد ذلك فصوص الراديو.

أعطت النفاثات دليلًا آخر لطبيعة المحرك المركزي. كانت بعض النفاثات مستقيمة تمامًا على مسافات تصل إلى مليون سنة ضوئية أو أكثر. إذا كان مصدر هذه النفاثات يدور، مثل فوهة الماء الدوارة تحت الدش، فإنها ستنتج نفاثات منحنية. وبالتالي، فإن استقامة النفاثات المرصودة تعني أن المحرك المركزي أطلق نفاثاته في نفس الاتجاه بالضبط لفترة طويلة جدًا.

منذ متى؟

بما أن غاز النفاثات لا يمكنه التحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء، وبما أن بعض النفاثات المستقيمة كانت أطول من مليون سنة ضوئية، فلا بد أن اتجاه إطلاق النفاثات كان ثابتًا لأكثر من مليون سنة.

ولتحقيق مثل هذا الثبات، يجب أن تكون «فوهات» المحرك الذي يقذف النفاثات، متصلة بجسم ثابت بشكل رائع -جيروسكوب طويل العمر من نوع ما. (تذكر أن الجيروسكوب عبارة عن جسم يلف محوريًا بسرعة ويحافظ على اتجاه محور دورانه ثابتًا بشكل مستقر لفترة طويلة جدًا. ومثل هذه الجيروسكوبات هي مكونات أساسية لأنظمة الملاحة بالقصور الذاتي للطائرات والصواريخ).

ومن بين عشرات الأفكار التي اقترحت في أوائل الثمانينيات لشرح المحرك المركزي لأشباه النجوم، كانت فكرة واحدة فقط تتضمن جيروسكوبًا رائعًا ذا عمر طويل، وحجم أقل من شهر ضوئي، وقدرة على توليد نفاثات قوية. كانت تلك الفكرة الفريدة عبارة عن ثقب أسود عملاق دوار.

الثقوب السوداء فائقة الضخامة

إن فكرة أن الثقوب السوداء العملاقة قد تزود النجوم الزائفة والمجرات الراديوية بالطاقة قد ابتكرها إدوين سالبيتر وياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيتش في عام 1964 (السنة الأولى من العصر الذهبي - الفصل السابع). كانت هذه الفكرة تطبيقاً واضحاً لاكتشاف سالبيتر-زيلدوفيتش بأن تيارات الغاز، التي تسقط باتجاه الثقب الأسود، يجب أن تتصادم وتطلق إشعاعاً (انظر الشكل 8.4).

وضع وصفاً أكثر اكتمالاً وواقعية لسقوط تيارات الغاز نحو الثقب الأسود في عام 1969 دونالد ليندن-بيل، عالم الفيزياء الفلكية البريطاني في كامبريدج. جادل ليندن-بيل بشكل مقنع، بأنه بعد تصادم تيارات الغاز، فإنها ستجتمع معاً وبعد ذلك ستجعلها قوى الطرد المركزي تدور حول الثقب عدة مرات قبل أن تسقط فيه؛ وعندما تلف في شكل دوامة، ستشكّل جسمًا على شكل قرص، يشبه إلى حد كبير الحلقات المحيطة بكوكب زحل، وهو القرص التراكمي كما أسماه ليندن-بيل، نظرًا لأن الغاز «يتراكم» على الثقب. (يظهر النصف الأيمن من الشكل 8.7 تصور فنان لمثل هذا القرص التراكمي حول الثقب متواضع الحجم في الدجاجة س-1). في قرص التراكم سوف تحتك تيارات الغاز المتجاورة بعضها ببعض، وسيعمل الاحتكاك الشديد الناتج عن هذا الاحتكاك على تسخين مادة القرص لدرجات حرارة عالية.

في الثمانينيات، أدرك علماء الفيزياء الفلكية أن الجسم اللامع الباعث للضوء الموجود في مركز 3C273، وهو جسم يبلغ حجمه شهرًا ضوئيًا واحدًا أو أقل، ربما كان قرص ليندن-بيل المتراكم المسخن بالاحتكاك.

نحن عادة نفكر في الاحتكاك باعتباره مصدرًا سيئًا للحرارة. تذكر فتى الكشف سيئ الحظ الذي حاول إشعال النار عن طريق فرك عودين معاً! ومع ذلك، فإن فتى الكشف مقيد بسبب قوته العضلية الضئيلة، في حين أن احتكاك القرص المتراكم يغذي طاقة الجاذبية. وبما أن طاقة الجاذبية هائلة، وأكبر بكثير من الطاقة النووية، فإن الاحتكاك يؤدي بسهولة إلى مهمة تسخين القرص وجعله أكثر سطوعاً 100 مرة من المجرات الساطعة.

كيف يمكن للثقب الأسود أن يكون بمثابة جيروسكوب؟

أدرك جيمس باردين وجاكوبوس بيترسون من جامعة يال الإجابة في عام 1975: إذا كان الثقب الأسود يدور بسرعة، فإنه يتصرف تمامًا مثل الجيروسكوب. يظل اتجاه دورانه ثابتًا دائمًا ولا يتغير، وتبقى دوامة الفضاء بالقرب من الثقب الناتج عن الدوران (الشكل 7.7) دائمًا موجهة بقوة في نفس الاتجاه. أظهر باردين وبيترسون من خلال حسابات رياضية أن دوامة الفضاء القريبة من الثقب يجب أن تمسك بالجزء الداخلي من القرص التراكمي وتثبتته بقوة في مستوى الخط الاستوائي للثقب - ويجب أن تفعل ذلك بصرف النظر عن كيفية توجيه القرص بعيدًا عن الثقب. (الشكل 9.6). عندما يُسحب غاز جديد من الفضاء بين - النجوم إلى الجزء البعيد من القرص، فقد يغير اتجاه القرص البعيد، لكنه لا يمكنه أبدًا تغيير اتجاه القرص بالقرب من الثقب. العمل الجيروسكوبي للثقب يمنع ذلك. بالقرب من الثقب، يبقى القرص دائمًا في المستوى الاستوائي للثقب.

من دون حل كبير لمعادلة مجال أينشتاين، لكن هذا الفعل الجيروسكوبي غير معروف، وربما كان من المستحيل تفسير النجوم الزائفة. ومع وجود حل كبير متاحًا، توصل علماء الفيزياء الفلكية في منتصف السبعينيات إلى تفسير واضح وأنيق. ولأول مرة، كان مفهوم الثقب الأسود كجسم ديناميكي، أكثر من مجرد «ثقب في الفضاء»، يلعب دورًا مركزيًا في شرح ملاحظات علماء الفلك.

ما مدى قوة دوامة الفضاء بالقرب من الثقب العملاق؟ بمعنى آخر، ما مدى سرعة دوران الثقوب العملاقة؟ استنتج جيمس باردين الإجابة: لقد أظهر رياضياً أن الغاز المتراكم في الثقب من قرصه يجب أن يجعل الثقب يدور تدريجيًا بشكل أسرع. بحلول الزمن الذي يبتلع فيه الثقب كمية كافية من الغاز الذي يتخذ شكل الدوامة لمضاعفة كتلته، يجب أن يدور الثقب بأقصى معدل ممكن تقريبًا، وهو المعدل الذي تمنع قوى الطرد المركزي بعده أي زيادة في السرعة (الفصل السابع). وبالتالي، يجب أن تحتوي الثقوب العملاقة عادةً على لف محوري قريب من الحد الأقصى.

Swirl of space



Swirl of space

9.6 نتيج عن اللف المحوري للثقب الأسود دوامة من المكان حول الثقب، وهذه الدوامة تحمل الجزء الداخلي من القرص التراكمي في مستوى خط الاستواء للثقب.

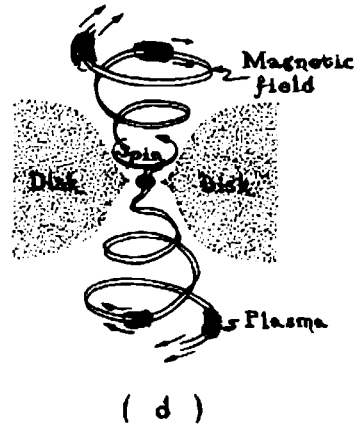
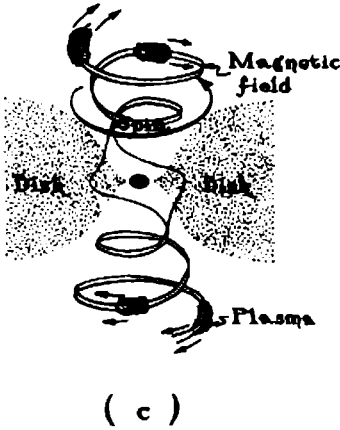
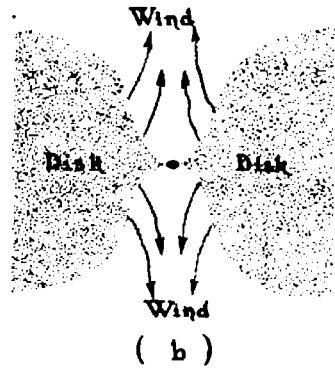
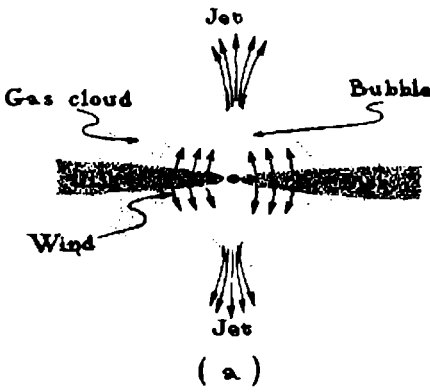
كيف يمكن للثقب الأسود وقرصه أن ينتجا نفائتين متعاكستين؟
من المثير للدهشة أن جامعة كامبريدج قد اعترفت بكل من بلاندفورد وريس وليندن-بيل في منتصف السبعينيات.

هناك أربع طرق ممكنة لإنتاج النفائات؛ يمكن لأي منها القيام بهذه المهمة.
أولاً، أدرك بلاندفورد وريس أن القرص قد يكون محاطاً بسحابة غاز بارد (الشكل 9.7a). قد تؤدي الرياح التي تهب على الوجهين العلوي والسفلي للقرص (المشابه للرياح التي تهب على سطح الشمس) إلى إنشاء فقاعة من الغاز الساخن داخل السحابة الباردة. قد يثقب الغاز الساخن بعد ذلك فتحات في الوجوه العلوية والسفلية للسحابة الباردة ويتدفق منها. تمامًا كما تعمل الفوهة الموجودة على خرطوم الحديقة على تجميع المياه المتدفقة لتشكيل تيارًا سريعًا ورفيعًا، كذلك يجب أن تعمل الفتحات الموجودة في السحابة الباردة على تجميع الغاز الساخن المتدفق لتكوين نفائات رفيعة.

تعتمد اتجاهات النفاثات على مواقع الفتحات. المواقع الأكثر احتمالاً، إذا كانت السحابة الباردة تدور حول نفس محور الثقب الأسود، فستكون على طول محور الدوران المشترك؛ أي متعامدة مع مستوى الجزء الداخلي من القرص التراكمي - وستنتج الفتحات الموجودة في هذه المواقع النفاثات التي يركز اتجاهها على الدوران الجيروسكوبي للثقب الأسود.

ثانياً، لأن القرص ساخن جداً، فإن ضغطه الداخلي مرتفع جداً، وقد يؤدي هذا الضغط إلى نفخ القرص حتى يصبح سميكاً جداً (الشكل 9.7 b). في هذه الحالة، أشار ليندن-بيل، إلى أن الحركة المدارية لغاز القرص ستنتج قوى طرد مركزي تخلق مسارات تشبه الدوامة في الوجهين العلوي والسفلي للقرص. تشبه هذه الممرات تماماً الدوامة التي تتشكل أحياناً عندما يدور الماء أسفل فتحة تصريف حوض الاستحمام. يشبه الثقب الأسود فتحة التصريف، والغاز الموجود في القرص يشبه الماء. يجب أن تكون وجوه الممرات الشبيهة بالدوامة ساخنة جداً، بسبب احتكاكات الغاز، لدرجة أنها تنفث رياحاً قوية بعيداً عنها، وقد تُجمّع الممرات بعد ذلك هذه الرياح في نفاثات، حسبما أوضح ليندن-بيل. ستكون اتجاهات النفاثات هي نفس اتجاهات الممرات، والتي بدورها مثبتة بقوة على محور الدوران الجيروسكوبي للثقب.

ثالثاً، أدرك بلانديفورد أن خطوط المجال المغناطيسي المثبتة في القرص والتي تخرج منه ستضطرب، بسبب الحركة المدارية للقرص، إلى الدوران حول نفسها (الشكل 9.7 c). ستتخذ خطوط المجال الدوارة شكلاً حلزونياً للخارج وللأعلى (أو للخارج وللأسفل). يجب أن تُثبت القوى الكهربائية الغاز الساخن (البلازما) على خطوط مجال اللف المحوري؛ يمكن أن تنزلق البلازما على طول خطوط المجال ولكن ليس عبرها. عندما تدور خطوط المجال، يجب أن تدفع قوى الطرد المركزي البلازما إلى الخارج على امتدادها لتشكل نفاثتين ممغنطتين، واحدة تنطلق للخارج وللأعلى، والأخرى للخارج وللأسفل. ومرة أخرى، ستثبت اتجاهات النفاثات بقوة في اتجاه اللف المحوري للثقب.



9.7 أربع طرق يمكن من خلالها للثقب الأسود أو القرص التراكمي الخاص به تشغيل نفثات مزدوجة. (a) تنفخ الرياح القادمة من القرص فقاعة في سحابة غازية تدور حولها؛ يخترق غاز الفقاعة الساخن فتحات عبر السحابة، على طول محور دورانها؛ وتطلق نفثات من الغاز الساخن الفتحات. (b) ينتفخ القرص بفعل ضغط حرارته الداخلية الكبيرة، ويشكّل سطح القرص الدوار المنتفخ قمعين يعملان على تجميع رياح القرص في نفثتين. (c) تضطر خطوط المجال المغناطيسي المثبتة في القرص إلى الدوران بسبب الدوران المداري للقرص؛ وفي أثناء دورانها، تدفع خطوط المجال البلازما إلى الأعلى وإلى الأسفل، وتنزلق البلازما على طول خطوط المجال وتشكّل نفثتين ممغنطتين. (d) تضطر خطوط المجال المغناطيسي التي تمر عبر الثقب الأسود إلى اللف المحوري بفعل دوامة المكان للثقب، وفي أثناء دورانها، تدفع خطوط المجال البلازما إلى الأعلى والأسفل لتشكّل نفثتين ممغنطتين.

الطريقة الرابعة لإنتاج النفاثات هي الأكثر إثارة للاهتمام من الطرق الأخرى وتتطلب المزيد من الشرح. في هذه الطريقة الرابعة، يُربط الثقب بواسطة خطوط المجال المغناطيسي كما هو موضح في الشكل 9.7 d. عندما يدور الثقب، فإنه يسحب خطوط المجال حوله، مما يتسبب في قذف البلازما لأعلى ولأسفل بنفس الطريقة المتبعة في الطريقة الثالثة، لتكوين نفاثتين. تنطلق النفاثات على طول محور دوران الثقب، وبالتالي يكون اتجاهها مثبتاً بقوة على الدوران الجيروسكوبي للثقب. قدّم بلانديفورد تصوّرًا لهذه الطريقة بعد وقت قصير من حصوله على درجة الدكتوراه في كامبريدج، بالتعاون مع طالب الدراسات العليا في كامبريدج، رومان زناجيك، ومن ثم أطلق عليها عملية بلانديفورد-زناجيك.

تعتبر عملية بلانديفورد-زناجيك مثيرة للاهتمام بشكل خاص، لأن الطاقة التي تدخل في النفاثات تأتي من الطاقة الدورانية الهائلة للثقب. (يجب أن يكون هذا واضحًا، لأن دوران الثقب هو الذي يتسبب في دوامة المكان، ودوامة المكان هي التي تسبب دوران خطوط المجال المغناطيسي، ودوران خطوط المجال هو الذي يدفع البلازما إلى الخارج).

كيف يمكن، في عملية بلانديفورد-زناجيك، أن يكون أفق الثقب مترابطًا بخطوط المجال المغناطيسي؟ ستكون خطوط المجال هذه بمثابة شكل من أشكال «الشعر» الذي يمكن تحويله إلى إشعاع كهرومغناطيسي ويدفع إشعاعه بعيدًا، وبالتالي، وفقًا لنظرية بريس (الفصل السابع)، يجب أن تدفع إشعاعها بعيدًا. في الواقع، نظرية بريس صحيحة فقط إذا كان الثقب الأسود موجودًا بمفرده، بعيدًا عن جميع الأجسام الأخرى. لكن الثقب الذي نناقشه ليس بمفرده؛ إنه محاط بقرص تراكمي. إذا انبثقت خطوط المجال في الشكل 9.7 d من الثقب، فإن الخطوط الخارجة من نصف الكرة الشمالي للفتحة وتلك الخارجة من نصف الكرة الجنوبي سوف يبين أنهما استمرار لبعضهما، والطريقة الوحيدة التي يمكن لهذه الخطوط أن تهرب بها هي عن طريق شق طريقها للخروج من خلال الغاز الساخن لقرص التراكم. لكن الغاز الساخن لن يسمح لخطوط المجال بالمرور؛ فهو يحصرها بقوة في منطقة المكان داخل الوجه الداخلي للقرص، وبما أن معظم تلك المنطقة مشغولة بالثقب، فإن معظم خطوط المجال المحصورة تمر عبر الثقب.

من أين تأتي خطوط المجال المغناطيسي هذه؟ من القرص نفسه.

كل الغازات الموجودة في الكون ممغنطة، على الأقل قليلًا، وغاز القرص ليس استثناءً.

ومع تراكم غاز القرص شيئاً فشيئاً في الثقب، يحمل معه خطوط المجال المغناطيسي. عند الاقتراب من الثقب، تنزلق كل قطعة من الغاز إلى أسفل خطوط المجال المغناطيسي وعبر الأفق، تاركة خطوط المجال خلفها، وتبرز خارج الأفق وتربطها بالطريقة الموضحة في الشكل 9.7 d. ينبغي لخطوط المجال الخيطية هذه، المحصورة بقوة بالقرص المحيط بها، أن تستخرج بعد ذلك الطاقة الدورانية للثقب من خلال عملية بلانديفورد-زناجيك.

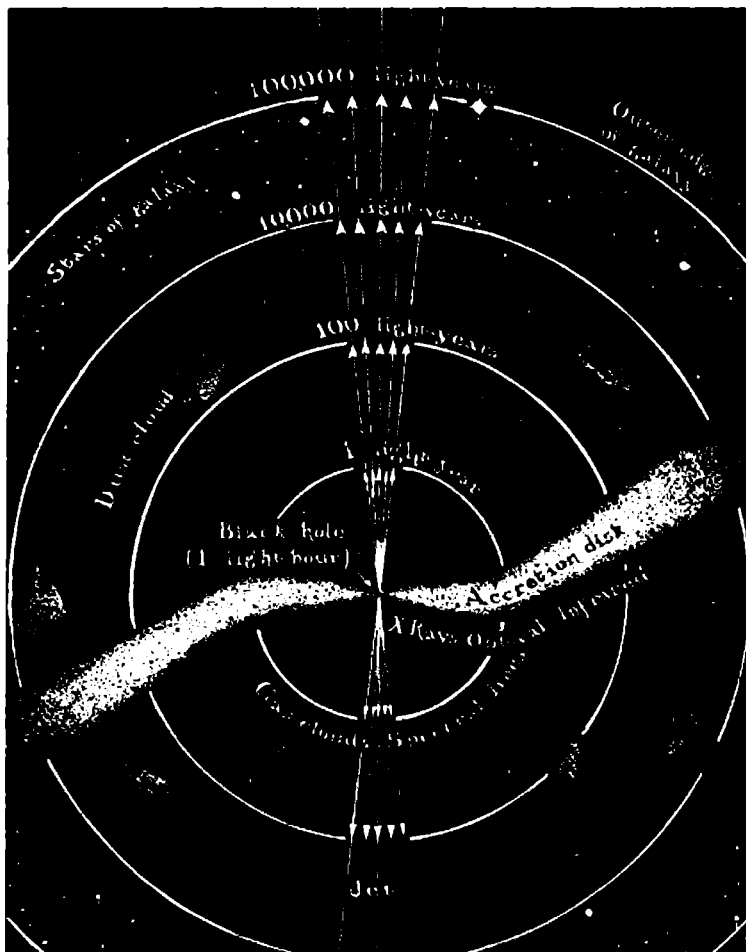
من المحتمل أن جميع الطرق الأربع لإنتاج النفاثات (فتحات في سحابة غازية، ورياح من قمع، وخطوط مجال دوّامية مثبتة في قرص، وعملية بلانديفورد-زناجيك) تعمل، بدرجات متفاوتة، في النجوم الزائفة، وفي المجرات الراديوية، وفي القلوب المميزة لبعض الأنواع الأخرى من المجرات (القلوب التي تسمى الأنوية النشطة للمجرات).

إذا كانت النجوم الزائفة والمجرات الراديوية مدعومة بنفس النوع من محركات الثقب الأسود، فما الذي يجعلها تبدو مختلفة تماماً؟ لماذا يبدو ضوء النجم الزائف وكأنه يأتي من جسم شديد الإضاءة يشبه النجم، ويبلغ حجمه شهراً ضوئياً واحداً أو أقل، بينما يأتي ضوء المجرة الراديوية من مجموعة نجوم تشبه درب التبانة، يبلغ عددها 100000 سنة ضوئية في الحجم؟

يبدو من المؤكد تقريباً أن النجوم الزائفة لا تختلف كثيراً عن المجرات الراديوية؛ كما أن محركاتها المركزية محاطة بمجرة من النجوم يبلغ حجمها 100000 سنة ضوئية. ومع ذلك، في النجم الزائف، يُغذّى الثقب الأسود المركزي بمعدل مرتفع بشكل خاص عن طريق تراكم الغاز (الشكل 9.8)، ويكون التسخين الاحتكاكي في القرص مرتفعاً بالمثل. وهذا التسخين الهائل يجعل القرص يلمع بقوة كبيرة بحيث يكون تألقه البصري أكبر بمئات أو آلاف المرات من تألق جميع النجوم في المجرة المحيطة مجتمعة. لا يستطيع علماء الفلك، الذين أعماهم تألق القرص، رؤية نجوم المجرة، وبالتالي يبدو الجسم «شبه نجمي» (أي شبيه بالنجم؛ مثل نقطة ضوء صغيرة ومكثفة) بدلاً من أن يبدو مثل المجرة 5.

المنطقة الأعمق من القرص ساخنة جداً بحيث تنبعث منها الأشعة السينية؛ وفي مكان أبعد قليلاً، يكون القرص أبرد وتنبعث منه الأشعة فوق البنفسجية؛ وفي منطقة لا تزال أبعد وأبرد ينبعث منه إشعاع بصري (ضوء)؛ وفي منطقتة الخارجية الأبعد يكون أبرد وتنبعث منه الأشعة تحت الحمراء. يبلغ حجم المنطقة الباعثة للضوء عادةً نحو سنة ضوئية، على

الرغم من أنه في بعض الحالات مثل 3C273 يمكن أن يكون شهرًا ضوئيًا أو أقصر، وبالتالي يمكن أن يختلف السطوع على مدى فترات قصيرة تصل إلى شهر. الكثير من الأشعة السينية والأشعة فوق البنفسجية المتدفقة من المنطقة الأعمق يضرب سحب الغاز ويسخنها على بُعد عدة سنوات ضوئية من القرص؛ إنها تلك السحب الساخنة التي تنبعث منها الخطوط الطيفية التي اكتُشفت من خلالها النجوم الزائفة لأول مرة. ستكون الرياح الممغنطة التي تهب من القرص، في بعض النجوم الزائفة ولكن ليس كلها، قوية بما يكفي ومتوازية بشكل جيد لإنتاج نفاثات باعثة لموجات الراديو.



8.9 أفضل ما لدينا من فهم لهياكل النجوم الزائفة والمجرات الراديوية. لقد طور هذا النموذج التفصيلي - المبني على جميع بيانات الرصد - ستيرل فيني من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا وآخرون.

في المجرة الراديوية، على النقيض من النجم الزائف، من المفترض أن يكون قرص التراكم المركزي هادئاً إلى حدٍّ ما. ومعنى كلمة الهدوء احتكاك بسيط في القرص، وبالتالي تسخين بسيط وإضاءة منخفضة، بحيث يلمع القرص بشكل أقل سطوعاً بكثير من بقية المجرة. وهكذا يرى علماء الفلك المجرة وليس من خلال القرص عبر التلسكوبات البصرية الخاصة بهم. ومع ذلك، فإن القرص، والثقب الدوار، والمجالات المغناطيسية المترابطة عبر الثقب معاً تنتج نفثات قوية، ربما بالطريقة الموضحة في الشكل 9.7 d (عملية بلانديفورد-زناجيك)، وتنتقل تلك النفثات عبر المجرة إلى الفضاء بين-المجرات. حيث تُغذي فصوص المجرة الضخمة بالطاقة التي ينبعث منها الراديو.

إن هذه التفسيرات المبنية على الثقوب السوداء للنجوم الزائفة والمجرات الراديوية ناجحة جداً، لدرجة أنه من المغري تأكيد أنها يجب أن تكون صحيحة، ويجب أن تكون نفثات المجرة بمثابة توقيع فريد يصرخ لنا: «لقد أتيت من ثقب أسود!»، ومع ذلك، فإن علماء الفيزياء الفلكية حذرون بعض الشيء. إنهم يريدون حالة أكثر صرامة. لا يزال من الممكن تفسير جميع الخصائص المرصودة للمجرات الراديوية والنجوم الزائفة باستخدام محرك بديل غير ثقب أسود: نجم ممغنط سريع الدوران وفائق الكتلة، يزن ملايين أو مليارات المرات مثل وزن الشمس - وهو نوع من النجوم لم يسبق لعلماء الفلك أن رأوه من قبل، لكن هذه النظرية تشير إلى أنه قد يتشكل في مراكز المجرات نجم كهذا فائق الكتلة سيتصرف مثل القرص التراكمي الموجود في الثقب. ومن خلال انكماشه إلى حجم صغير (لكن حجمه لا يزال أكبر من محيطه الحرج)، يمكنه إطلاق كمية هائلة من طاقة الجاذبية؛ تلك الطاقة وعن طريق الاحتكاك يمكنها تسخين النجم بحيث يضيء بشكل ساطع مثل القرص التراكمي؛ ويمكن لخطوط المجال المغناطيسي الراسية في النجم أن تدور وتطلق البلازما في نفثات.

ربما تكون بعض المجرات الراديوية أو النجوم الزائفة مدعومة بمثل هذه النجوم فائقة الكتلة. ومع ذلك، فإن قوانين الفيزياء تصر على أن مثل هذا النجم يجب أن ينكمش تدريجياً إلى حجم أصغر فأصغر، وبعد ذلك، عندما يقترب من محيطه الحرج، يجب أن ينفجر ليشكل ثقباً أسود. يجب أن يكون إجمالي عمر النجم قبل الانفجار الداخلي أقل بكثير من عمر الكون. يشير هذا إلى أنه، على الرغم من أن أصغر المجرات الراديوية والنجوم الزائفة قد تكون مدعومة بنجوم فائقة الكتلة، فمن المؤكد تقريباً أن المجرات

الأقدم تحصل على الطاقة من خلال ثقب عملاقة - يكاد يكون من المؤكد، ولكن ليس بشكل مطلق. إن هذه الحجج ليست صارمة.

ما مدى شيوع الثقوب السوداء العملاقة؟ تشير الأدلة، التي تراكمت تدريجياً خلال الثمانينيات، إلى أن مثل هذه الثقوب لا تسكن فقط في قلوب معظم النجوم الزائفة والمجرات الراديوية، ولكن أيضاً أنوية معظم المجرات الكبيرة العادية (غير الراديوية) مثل درب التبانة والمرأة المسلسلة، وحتى في قلوب بعض المجرات الصغيرة مثل رفيقة المرأة المسلسلة القزمة M32. في المجرات العادية (درب التبانة، المرأة المسلسلة، M32) من المفترض أن الثقب الأسود لا يكون محاطاً بقرص تراكمي على الإطلاق، أو فقط بقرص هش يتدفق بكميات متواضعة من الطاقة.

إن الدليل على وجود مثل هذا الثقب في مجرتنا درب التبانة (اعتباراً من عام 1993) هو دليل مقترح، ولكنه ليس ثابتاً على الإطلاق. أحد الأدلة الرئيسية يأتي من الحركات المدارية لسحب الغاز بالقرب من مركز المجرة. تُظهر عمليات رصد تلك السحب بالأشعة تحت الحمراء، التي أجراها تشارلز تاونز وزملاؤه في جامعة كاليفورنيا في بيركلي، أنها تدور حول جسم يزن نحو 3 ملايين مرة وزن الشمس، وتكشف عمليات الرصد الراديوي عن جرم سماوي غريب جداً - وإن لم يكن قوياً - هو مصدر الموجات الراديوية في موقع الجرم السماوي المركزي - مصدر راديوي صغير بشكل مذهل، وليس أكبر من نظامنا الشمسي. هذه هي أنواع البيانات الرصدية التي يمكن للمرء أن يتوقعها من ثقب أسود هادئ كتلته 3 ملايين كتلة شمسية، ولا يوجد به سوى قرص تراكمي هش، ولكن يمكن أيضاً شرحها بسهولة بطرق أخرى.

كانت احتمالية وجود ثقب سوداء عملاقة تقع في قلب المجرات بمثابة مفاجأة هائلة لعلماء الفلك. ومع ذلك، عند العودة إلى الماضي، من السهل أن نفهم كيف يمكن أن تتشكل مثل هذه الثقوب في قلب المجرة.

في أي مجرة، عندما يمر نجمان بالقرب من بعضهما، فإن قوى الجاذبية الخاصة بهما تجعلهما يتأرجحان حول بعضهما ثم تدفعهما في اتجاهات مختلفة عن مساراتهما الأصلية. (هذا النوع نفسه من التأرجح والقذف يغير مدارات السفينة الفضائية التابعة لناسا عندما تواجه كواكب مثل المشتري). في التأرجح والقذف، عادةً ما يندفع أحد النجوم

إلى الداخل، باتجاه مركز المجرة، في حين يندفع الآخر إلى الخارج بعيداً عن المركز. إن التأثير التراكمي للعديد من هذا التأرجح والقذف هو الذي دفع بعض نجوم المجرة إلى أعماق قلب المجرة. وبالمثل، فقد تبين أن التأثير التراكمي للاحتكاك في الغاز بين-النجوم في المجرة هو الذي دفع الكثير من الغاز إلى قلب المجرة.

مع تراكم المزيد والمزيد من الغازات والنجوم في القلب، يجب أن تصبح جاذبية التكتلات التي تشكلها أقوى بشكل متزايد. في نهاية المطاف، قد تصبح جاذبية التكتل قوية جداً لدرجة أنها تطفئ على ضغطها الداخلي، وقد ينفجر التكتل ليشكل ثقباً عملاقاً. وبدلاً من ذلك، قد تنفجر النجوم الضخمة في التكتل لتشكل ثقباً صغيراً، وقد تصطدم تلك الثقوب الصغيرة ببعضها ومع النجوم والغاز لتشكل ثقباً أكبر ثم أكبر، حتى يهيمن ثقب واحد عملاق على القلب. إن تقديرات الزمن اللازم لمثل هذه الانفجارات الداخلية والاصطدامات والالتحامات تجعل الأمر يبدو معقولاً (وإن لم يكن مقنعاً)؛ أن معظم المجرات قد كوَّنت ثقباً سوداء عملاقة في مراكزها قبل زمن طويل من الآن.

لولا أن البيانات الرصدية الفلكية أشارت بقوة إلى أن مراكز المجرات تسكنها ثقوب سوداء عملاقة، فإن علماء الفيزياء الفلكية ربما وحتى وقت الكتاب ربما لم يكونوا ليتوقعوها. ومع ذلك، نظراً لأن البيانات الرصدية تشير إلى وجود ثقوب عملاقة، فإن علماء الفيزياء الفلكية يتكيفون بسهولة مع هذا الاقتراح. وهذا يدل على ضعف فهمنا لما يحدث بالفعل في قلب المجرات.

ماذا عن المستقبل؟ هل يجب أن نقلق من أن الثقب العملاق في مجرتنا درب التبانة قد يبتلع الأرض؟ بعض الأرقام تضع العقل في راحة. يزن الثقب المركزي لمجرتنا (إذا كان موجوداً بالفعل) نحو 3 ملايين ضعف وزن الشمس، وبالتالي يبلغ محيطه نحو 50 مليون كيلومتر، أو 200 ثانية ضوئية، أي نحو عُشر محيط مدار الأرض حول الشمس. وهذا صغير جداً مقارنة بحجم المجرة نفسها. تدور أرضنا والشمس حول مركز المجرة في مدار يبلغ محيطه 200 ألف سنة ضوئية؛ أي أكبر بنحو 30 مليار مرة من محيط الثقب. إذا كان الثقب سيبتلع في نهاية المطاف معظم كتلة المجرة، فإن محيطه سوف يتوسع فقط إلى نحو سنة ضوئية واحدة؛ أي أصغر بـ 200 ألف مرة من محيط مدارنا.

بطبيعة الحال، خلال ما يقرب من 10^{18} سنة (100 مليون مرة عمر الكون الحالي)

التي سيتطلبها ثقبنا المركزي لابتلاع جزء كبير من كتلة مجرتنا، سوف يتغير مدار الأرض والشمس بشكل كبير. ولا يمكن التنبؤ بتفاصيل تلك التغيرات، لأننا لا نعرف جيداً مواقع وحركات جميع النجوم الأخرى التي قد تواجهها الشمس والأرض خلال 10^{18} سنة. وبالتالي، لا يمكننا التنبؤ بما إذا كانت الأرض والشمس سينتهي بهما الأمر، في نهاية المطاف، داخل الثقب المركزي للمجرة، أو سيُطردان خارج المجرة. ومع ذلك، يمكننا أن نثق بأنه إذا ابتلع الأرض في نهاية المطاف، فإن زوالها سيحدث بعد 10^{18} عام تقريباً في المستقبل -وهو بعيد جداً بحيث يكاد يكون من المؤكد أن العديد من الكوارث الأخرى ستحل بالأرض والإنسانية في هذه الأثناء.

1. أقصد بالضوء دائماً في هذا الكتاب نوع الموجات الكهرومغناطيسية التي تراها العين البشرية؛ أي الإشعاع البصري.
2. انظر الشكل 7.3. لم يشتهر جينزبرج بهذه الاكتشافات، بل باكتشاف آخر: وهو تطويره، مع ليف لاندau، لـ«نظرية جينزبرج-لاندau» للتوصيلية الفائقة (أي تفسير لكيفية أن بعض المعادن، عندما تصبح باردة جداً، تفقد كل مقاومتها لتدفق الكهرباء). يعد جينزبرج أحد «فيزيائي عصر النهضة» القلائل في العالم، وهو رجل ساهم بشكل كبير في جميع فروع الفيزياء النظرية تقريباً.
3. للحصول على معلومات أساسية، راجع مدخل «المادة المضادة» في المرسد، والحاشية الثانية في الفصل الخامس.
4. لقد تراكمت المجالات المغناطيسية باستمرار على مدار عمر الكون من خلال حركات الغازات النجمية وبين-النجمية، وبمجرد توليدها، يصبح من الصعب للغاية التخلص من المجالات المغناطيسية. عندما يتراكم الغاز بين-النجمي في القرص التراكمي، فإنه يحمل معه مجالاته المغناطيسية.
5. كلمة «النجم الزائف» هي اختصار لكلمة «شبه نجمي».

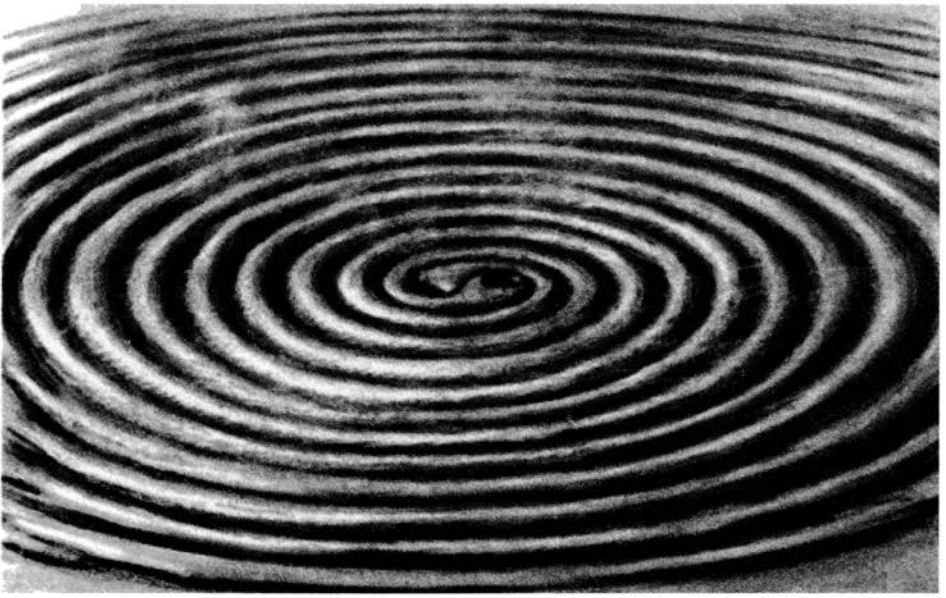
الفصل العاشر: تموجات الانحناءات

والذي فيه موجات الجاذبية تحمل إلى الأرض شفرة سيمفونيات تصادم الثقوب السوداء وإلى أجهزة القياس للفيزيائيين ليفكوا شفرة هذه السيمفونيات

السيمفونيات

في قلب مجرة بعيدة، على بُعد مليار سنة ضوئية من الأرض وقبل مليار سنة، تراكمت كتلة كثيفة من الغاز ومئات الملايين من النجوم. وانكماش التكتل تدريجيًا، حيث تناثر نجم تلو الآخر، وغرقت النجوم الـ 100 مليون المتبقية بالقرب من المركز. وبعد 100 مليون سنة، انكمش حجم التكتل إلى عدة سنوات ضوئية، وبدأت النجوم الصغيرة، من حين لآخر، في الاصطدام والتجمع لتشكّل نجومًا أكبر. استهلكت النجوم الأكبر حجم وقودها ثم انفجرت لتشكّل ثقوبًا سوداء، وأحيانًا التقطت أزواج من الثقوب -القريبة من بعضها- في مدارٍ بعضها حول بعض.

ويبين الشكل 10.1 مخطط التضمين لأحد ثنائيات الثقوب الأسود. يخلق كل ثقب حفرة عميقة (انحناء الزمكان القوي) في السطح المضمن، وبينما تطوق الثقوب بعضها بعضًا، تنتج الحفر المدارية تموجات من الانحناء تنتشر للخارج بسرعة الضوء. تشكّل التموجات دوامة في نسيج الزمكان حول الثنائي، تشبه إلى حد كبير النمط المتصاعد للمياه من رشاشات العشب سريعة الدوران. تمامًا كما تطير كل قطرة ماء من الرشاش بشكل متعامد تقريبًا إلى الخارج، كذلك فإن كل جزء من الانحناء يطير بشكل عمودي تقريبًا إلى الخارج؛ وكما تشكّل القطرات المتطايرة إلى الخارج معًا تيارًا حلزونيًا من الماء، كذلك تشكّل كل أجزاء الانحناء معًا تلالًا ووديانًا حلزونية في نسيج الزمكان.



10.1 مخطط التضمين بـصور انحناء الفضاء في «المستوى» المداري لنظام ثنائي مكون من ثقبين أسودين. يوجد في المركز حفرتان تمثلان انحناء الزمكان القوي حول الثقبين. هذه الحفرة هي نفسها التي واجهناها في مخططات تضمين الثقب الأسود السابقة، على سبيل المثال، الشكل 7.6. عندما تدور الثقوب بعضها حول بعض، فإنها تخلق موجات انحناء منتشرة إلى الخارج تسمى موجات الجاذبية. [إهداء من مشروع LIGO، معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا].

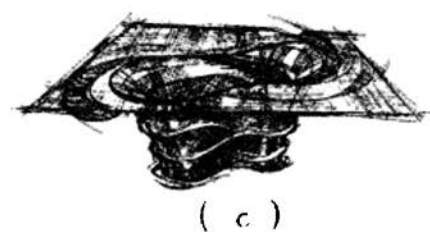
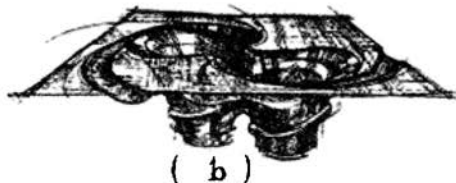
وبما أن انحناء الزمكان هو نفسه الجاذبية، فإن موجات الانحناء هذه هي في الواقع موجات من الجاذبية، أو موجات الجاذبية. تتنبأ نظرية النسبية العامة لأينشتاين، بشكل لا جدال فيه، بأن مثل موجات الجاذبية هذه يجب أن تنشأ عندما يدور أحد ثقبين أسودين حول آخر، وأيضًا عندما يدور أحد نجمين حول آخر.

في أثناء مغادرتها إلى الفضاء الخارجي، تدفع موجات الجاذبية الثقوب للخلف بنفس الطريقة التي ترتد بها الرصاصة على البندقة التي تطلقها. يؤدي دفع الأمواج إلى تقريب الثقوب من بعضها وإلى سرعات أعلى؛ أي أنها تجعلها تتجه نحو الداخل ببطء تجاه بعضها. تطلق الدوامة طاقة الجاذبية تدريجيًا، حيث يذهب نصف الطاقة المتحررة إلى الأمواج والنصف الآخر إلى زيادة السرعات المدارية للثقوب.

يكون الدوران في شكل الدوامة للثقوب بطيئًا في البداية، ولكن كلما اقتربت الثقوب من

بعضها، تحركت بشكل أسرع، وزادت قوة موجات الانحناء الخاصة بها، وزادت سرعة فقدانها للطاقة وتحولها إلى الداخل (الشكل 10.2 a, b). في النهاية، عندما يتحرك كل ثقب بسرعة الضوء تقريبًا، فإن آفاقه تتلامس وتندمج. فبينما كان هناك ثقبان في السابق، أصبح الآن هناك ثقب واحد - ثقب على شكل دمبل يلف محوريًا بسرعة (الشكل 10.2 c). عندما يلف الأفق حول محوره، يشع شكل الدمبل الخاص بموجات من الانحناءات، وترتد تلك التموجات على الثقب، مما يقلل تدريجيًا من نتوءات الدمبل حتى تختفي (الشكل 10.2 d). يُترك أفق الثقب الدوار أملس ودائريًا تمامًا في المقطع العرضي عند خط الاستواء، مع الشكل الدقيق الذي وصفه حل كير لمعادلة أينشتاين للمجال (الفصل السابع).

ومن خلال فحص الثقب الأسود الأملس النهائي، لا يمكن للمرء بأي حال اكتشاف تاريخه الماضي. لا يمكن للمرء أن يميز ما إذا كان قد نشأ عن طريق اندماج ثقبين أصغر، أو عن طريق الانفجار الداخلي المباشر لنجم مصنوع من المادة، أو عن طريق الانفجار الداخلي المباشر لنجم مصنوع من المادة المضادة. ليس للثقب الأسود «شعر» يمكن من خلاله التنبؤ بتاريخه (الفصل السابع).



10.2 مخطط التضمين الذي يصور انحناء الفضاء حول نظام ثنائي مكون من ثقبين أسودين. زين الفنان المخططات لإضفاء إحساس بالحركة. يقع كل رسم تخطيطي متتالٍ في لحظة لاحقة من الزمن، عندما يقترب الثقبان من بعضهما. في الشكلين (a) و (b)، تكون آفاق الثقوب هي الدوائر الموجودة في قيعان الحفر. وتندمج الآفاق قبل الشكل (c) مباشرة لتشكّل أفقًا واحدًا على شكل دمبل. يُصدر الدمبل الدوار موجات جاذبية، تُزيل تشوهه، تاركة وراءها ثقبًا أسود ناعمًا دوارًا، على شكل ثقب كبير الأسود في الشكل (d). [إهداء من مشروع LIGO، معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا].

ومع ذلك، فإن التاريخ لم يَضَعُ تمامًا. احتفظنا بسجل: شفرة داخل موجات انحناء الزمكان المنبعثة من ثقوب الاندماج. تشبه موجات الانحناء هذه إلى حد كبير الموجات الصوتية الصادرة عن سيمفونية. وكما تشفر السيمفونية في تشكيلات الموجات الصوتية (نطاق أكبر هنا، أصغر هناك؛ التردد الأعلى يهتز هنا، وينخفض هناك)، فإن تاريخ الاندماج مشفر في تشكيلات موجات الانحناءات. وكما تحمل الموجات الصوتية سيمفونيتها المشفرة من الأوركسترا التي تنتجها إلى الجمهور، كذلك تحمل التموجات المنحنية تاريخها المشفر من الثقوب المتجمعة إلى الكون البعيد.

تنتقل موجات الانحناء إلى الخارج في نسيج الزمكان، عبر تكتل النجوم والغاز حيث وُلد الثقبان. لا يمتص التكتل أيًا من التموجات ولا يشوهها على الإطلاق؛ يظل تاريخ التموجات المشفر من دون تغيير تمامًا. تنتشر التموجات إلى الخارج، عبر المجرة الأم للتكتل وفي الفضاء بين المجرات، عبر مجموعة المجرات التي توجد فيها المجرة الأم، ثم للآمام عبر مجموعة من المجرات تلو الأخرى وإلى عنقودنا المجري، ثم إلى مجرتنا درب التبانة. وإلى نظامنا الشمسي، ثم عبر الأرض، ثم تنطلق نحو المجرات البعيدة الأخرى.

إذا كنا نحن البشر أذكاء بما فيه الكفاية، يجب أن نكون قادرين على مراقبة موجات انحناء الزمكان في أثناء مرورها. يمكن لأجهزة الحاسوب الخاصة بنا أن تترجمها من موجات الانحناء إلى موجات الصوت، وبعد ذلك سنسمع سيمفونية الثقوب: سيمفونية ترتفع تدريجيًا في حدة وشدة عندما تلتف الثقوب معًا، ثم تدور بطريقة جامحة عندما تندمج في ثقب واحد، ثقب مشوه، ثم تتلاشى ببطء في خطوة ثابتة حيث تنكمش نتوءات الثقب وتختفي تدريجيًا.

إذا تمكنا من فك شفرتها، فإن سيمفونية التموجات ستحتوي على ثروة من المعلومات:

1. ستحتوي السيمفونية على توقيع يقول: «لقد جئت من زوج من الثقوب السوداء التي تتصاعد وتتحد معًا». سيكون هذا هو نوع توقيع الثقب الأسود الذي لا جدال فيه على الإطلاق والذي بحث عنه علماء الفلك حتى الآن من دون جدوى باستخدام الضوء والأشعة السينية (الفصل الثامن) وموجات الراديو (الفصل التاسع). لأن الضوء والأشعة السينية وموجات الراديو تنتج بعيدًا خارج أفق الثقب، ولأنها

تنبعث من نوع مادة (الإلكترونات ساخنة وعالية السرعة) تختلف تمامًا عن تلك التي يتكون منها الثقب (انحناء الزمكان النقي)، ولأنها يمكن أن تكون مشوهة بشدة عن طريق الانتشار من خلال مادة متداخلة، فإنها لا تقدم لنا سوى القليل من المعلومات حول الثقب، وليس لها توقيع نهائي. على النقيض من ذلك، تنتج موجات الانحناء (موجات الجاذبية) قريبة جدًا من آفاق الثقوب الملتحمة، وهي مصنوعة من نفس مادة الثقوب (صفحة ملتوية لنسيج الزمكان)، ولا تشوه على الإطلاق عن طريق الانتشار من خلال المادة المتداخلة، ونتيجة لذلك، يمكنها أن تقدم لنا معلومات مفصلة عن الثقوب وتوقيعًا يبين للثقب الأسود.

2. يمكن لسيمفونية التموجات أن تخبرنا عن مدى ثقل كل ثقب من الثقبين، وسرعة لفها المحوري، وشكل مدارها (دائري؟ ممدود؟)، ومكان وجود الثقوب في سمائنا، وإلى أي مدى تبتعد عن الأرض.

3. ستحتوي السيمفونية على خريطة جزئية للانحناء الزمكاني للثقوب التي تدور في شكل دوامة. لأول مرة ستكون قادرين على اختبار تنبؤات الثقب الأسود في النسبية العامة بشكل نهائي: هل تتفق خريطة السيمفونية مع حل كير لمعادلة مجال أينشتاين (الفصل السابع)؟ هل تُظهر الخريطة الفضاء يحوم بالقرب من الثقب الدوار، كما يتطلب حل كير؟ هل يتوافق مقدار الدوامة مع حل كير؟ هل الطريقة التي تتغير بها الدوامة مع اقتراب المرء من الأفق تتفق مع حل كير؟

4. ستصف السيمفونية اندماج آفاق الثقبين والاهتزازات الجامحة للثقبين المندمجين حديثًا -الاندماج والاهتزازات التي ليس لدينا اليوم سوى فهم غامض عنها. نحن نفهمها بشكل غامض فقط لأنها محكومة بسمات من سمات قوانين النسبية العامة لأينشتاين التي لا نفهمها إلا بشكل سيئ: القوانين اللا خطية (الإطار 10.1). يُقصد بـ«اللا خطية» ميل الانحناء القوي نفسه إلى إنتاج المزيد من الانحناء، والذي بدوره ينتج المزيد من الانحناء -يشبه إلى حد كبير نمو الانهيار الجليدي، حيث تسحب قطرة من الثلج المنزلق ثلجًا جديدًا إلى التدفق، والذي بدوره ينتزع المزيد من الثلوج حتى يتحرك جبل كامل من الثلج. نحن نفهم هذه اللا خطية في الثقب الأسود الهادي؛ وهناك يكون مسؤولًا عن تماسك الثقب؛ إنه «غراء» الثقب. لكننا لا نفهم ما الذي تفعله اللا خطية، وكيف تتصرف، وما هي آثارها،

عندما يكون الانحناء قويًا ديناميكيًا بعنف. إن اندماج واهتزاز الثقبين هو «مختبر» واعد للبحث عن مثل هذا الفهم. يمكن أن يأتي الفهم من خلال التعاون يدًا بيد بين علماء الفيزياء التجريبية الذين يراقبون التموجات السيمفونية الناتجة عن اندماج الثقوب في الكون البعيد، وعلماء الفيزياء النظرية الذين يحاكون الاندماج على أجهزة الحاسوب العملاقة.

الإطار 10.1

اللا خطية وعواقبها

تسمى كمية ما لا خطية إذا كان حجمها الإجمالي هو مجموع أجزائها؛ وإلا فهو لا خطي. دخل عائلتي خطي: إنه مجموع راتب زوجتي ودخلي. إن مبلغ المال الذي أملكه في صندوق التقاعد الخاص بي لا خطي: فهو ليس مجموع جميع المساهمات التي استثمرتها في الماضي، بل هو أكبر بكثير من هذا المبلغ، لأن كل مساهمة بدأت تكتسب فائدة عندما استثمرت، وكل جزء من الفائدة بدوره حصل على فائدة خاصة به.

حجم المياه المتدفقة في أنبوب الصرف الصحي خطي: وهو مجموع المساهمات من جميع المنازل التي تغذي الأنبوب. حجم الثلوج المتدفقة في الانهيار الجليدي لا خطي: يمكن لقطرة صغيرة من الثلج أن تؤدي إلى بدء انزلاق جبل كامل من الثلج.

الظواهر الخطية بسيطة وسهلة التحليل وسهلة التنبؤ. الظواهر اللا خطية معقدة ويصعب التنبؤ بها. تُظهر الظواهر الخطية أنواعًا قليلة فقط من السلوكيات؛ من السهل تصنيفها. تُظهر الظواهر اللا خطية ثراءً عظيمًا، وهو ثراء لم يقدّره العلماء والمهندسون إلا في السنوات الأخيرة، عندما بدأوا في مواجهة نوع من السلوك اللا خطي يسمى الفوضى. (للحصول على مقدمة جميلة لمفهوم الفوضى انظر جليك، 1987).

عندما يكون انحناء الزمكان ضعيفًا (كما هي الحال في النظام الشمسي)، فإنه يكون خطيًا تقريبًا؛ على سبيل المثال، المد والجزر في محيطات الأرض هما مجموع المد والجزر الناتجين عن انحناء الزمكان للقمر (المد والجزر بفعل الجاذبية) والمد والجزر الناتجين عن الشمس. على النقيض من ذلك، عندما يكون انحناء الزمكان قويًا (كما

هي الحال في الانفجار الأعظم وبالقرب من الثقب الأسود)، تنبأ قوانين النسبية العامة للجاذبية لأينشتاين بأن الانحناء يجب أن يكون لا خطياً للغاية، وهو من بين أكثر الظواهر اللا خطية في الكون. ومع ذلك، فإننا لا نملك حتى الآن تقريباً أي بيانات تجريبية أو رصدية توضح لنا تأثيرات اللا خطية بفعل الجاذبية، كما أننا غير أكفاء في حل معادلة أينشتاين لدرجة أن حلولنا لم تعلمنا عن اللا خطية إلا في مواقف بسيطة -على سبيل المثال، حول كوكب هادئ أو ثقب أسود دوار.

يدين الثقب الأسود الهادئ بوجوده إلى لا خطية الجاذبية؛ ومن دون اللا خطية بفعل الجاذبية، لا يمكن للثقب أن يجمع نفسه معاً، تماماً كما هي الحال من دون اللا خطية الغازية، فإن البقعة الحمراء الكبيرة على كوكب المشتري لا تستطيع أن تماسك معاً. عندما يختفي النجم المتفجر الذي يشكّل ثقباً أسود عبر أفق الثقب، يفقد النجم قدرته على التأثير على الثقب بأي شكل؛ والأهم من ذلك، أن جاذبية النجم لم تعد قادرة على ربط الثقب ببعضه. ومن ثم يستمر الثقب في الوجود فقط بسبب اللا خطية بفعل الجاذبية: إذ يحدد انحناء الزمكان في الثقب نفسه باستمرار بشكل لا خطي، من دون مساعدة النجم؛ ويعمل الانحناء الناتج ذاتياً «غراء» لا خطياً لربط نفسه ببعضه.

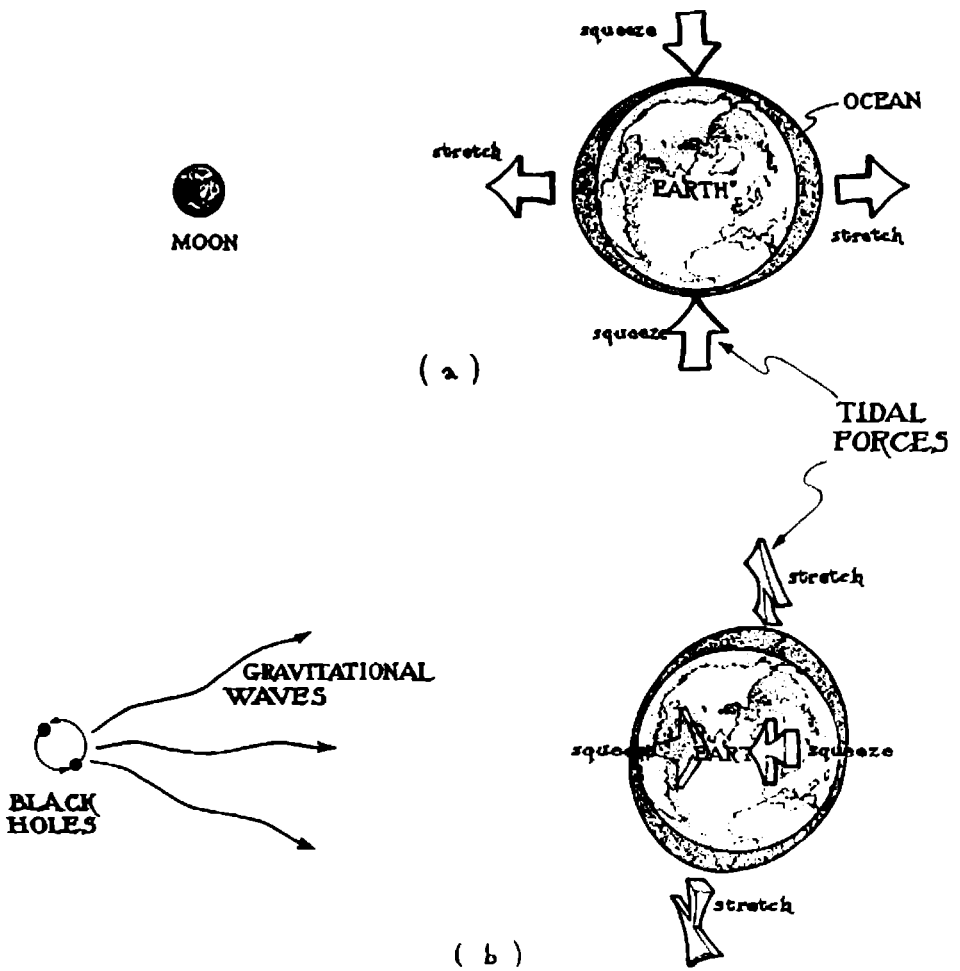
الثقب الأسود الهادئ يشير شهيتنا لمعرفة المزيد. ما الظواهر الأخرى التي يمكن أن تنتجها اللا خطية بفعل الجاذبية؟ قد تأتي بعض الإجابات من بيانات الرصد وفك تشفير تموجات انحناء الزمكان الناتجة عن اندماج الثقوب السوداء. قد نرى هناك سلوكيات فوضوية وغريبة لم نتوقعها قط.

ولتحقيق هذا الفهم سوف يتطلب الأمر مراقبة تموجات سيمفونية الانحناءات للثقوب. كيف يمكن مراقبتها؟ المفتاح هو الطبيعة الفيزيائية للانحناء: انحناء الزمكان هو نفس المد والجزر بفعل الجاذبية. يؤدي انحناء الزمكان الناتج عن القمر إلى رفع المد والجزر في محيطات الأرض (الشكل 10.3 a)، ويجب أن تؤدي تموجات انحناء الزمكان في موجة الجاذبية بالمثل إلى رفع المد والجزر في المحيطات (الشكل 10.3 b).

ومع ذلك، تصر النسبية العامة على أن المد والجزر في المحيطات اللذين يثيرهما القمر واللذين تثيرهما موجة الجاذبية؛ تختلف عن بعضها في ثلاثة أوجه رئيسية. الفرق

الأول هو الانتشار. تشبه قوى المد والجزر لموجة الجاذبية (تموجات الانحناء) موجات الضوء أو موجات الراديو: فهي تنتقل من مصدرها إلى الأرض بسرعة الضوء، وتتأرجح في أثناء انتقالها. وعلى النقيض من ذلك، فإن قوى المد والجزر للقمر تشبه المجال الكهربائي لجسم مشحون. تمامًا كما يرتبط المجال الكهربائي بقوة بالجسم المشحون ويحملة الجسم، فيبرز دائمًا من نفسه مثل ريشات القنفذ، كذلك ترتبط قوى المد والجزر بقوة بالقمر، ويحملها القمر، يخرج من داخله بطريقة لا تتغير أبدًا، وعلى استعداد دائمًا للإمساك بأي شيء يأتي في محيط القمر والضغط عليه وتمديده. إن قوى المد والجزر للقمر تضغط على محيطات الأرض وتمدها بطريقة تبدو وكأنها تتغير كل بضع ساعات فقط لأن الأرض تدور من خلالها. إذا لم تُدّر الأرض، فسيكون الضغط والتمدد ثابتين، من دون تغيير.

والفرق الثاني هو اتجاه المد والجزر (الشكل 10.3 a, b): ينتج القمر قوى مد وجزر في جميع الاتجاهات المكانية. فهو يمد المحيطات في الاتجاه الطولي (باتجاه القمر وبعيدًا عنه)، ويضغط على المحيطات في اتجاهات عرضية (متعامدة مع اتجاه القمر). على النقيض من ذلك، لا تنتج موجة الجاذبية أي قوى مد وجزر على الإطلاق في الاتجاه الطولي (على طول اتجاه انتشار الموجة). ومع ذلك، في المستوى العرضي، تمتد الموجة المحيطات في اتجاه واحد (الاتجاه من أعلى إلى أسفل في الشكل 10.3 b) وتضغط على طول الاتجاه الآخر (الاتجاه الأمامي-الخلفي في الشكل 10.3 b). هذا التمدد والانضغاط متذبذبان. عندما تمر قمة الموجة، يكون الامتداد من أعلى إلى أسفل، ويكون الضغط من الأمام إلى الخلف؛ ومع مرور قاع الموجة، يحدث انعكاس للضغط لأعلى ولأسفل والتمدد الأمامي والخلفي؛ مع وصول القمة التالية، هناك انعكاس مرة أخرى للامتداد لأعلى ولأسفل والضغط الأمامي والخلفي.



10.3 قوى المد والجزر التي ينتجها القمر وموجة الجاذبية. (a) تمتد قوى المد والجزر وتضغط على محيطات الأرض؛ الامتداد طولي والضغط عرضي. (b) تمتد قوى المد والجزر الناجمة عن موجة الجاذبية وتضغط على محيطات الأرض؛ القوى مستعرضة تمامًا، مع تمدد على طول اتجاه عرضي واحد وضغط على طول الاتجاه الآخر.

والفرق الثالث بين مد القمر وجزره، ومد موجة الجاذبية وجزرها، هو حجمها. وينتج القمر مدًا يبلغ حجمه مترًا واحدًا تقريبًا، وبالتالي فإن الفرق بين المد العالي والمد المنخفض يبلغ نحو مترين. على النقيض من ذلك، يجب أن تنتج موجات الجاذبية الناتجة عن اندماج الثقوب السوداء مدًا وجزرًا في محيطات الأرض لا يزيد حجمهما

على 10^{-14} متر تقريبًا، وهو ما يعادل 10^{-21} من حجم الأرض ($10,000 / 1$) من حجم ذرة واحدة)، وأكبر بعشر مرات فقط من نواة الذرة. وبما أن قوى المد والجزر تتناسب مع حجم الجسم الذي تؤثر عليه (الفصل الثاني)، فإن الموجات سوف تؤثر بالمد والجزر على أي جسم بنحو 10^{-21} من حجمه. وبهذا المعنى، فإن 10^{-21} هي قوة الموجات عند وصولها إلى الأرض.

لماذا الأمواج ضعيفة جدًا؟ لأن ثقب الاندماج بعيدة جدًا. إن قوة موجة الجاذبية، مثل قوة موجة الضوء، تتضاءل عكسيًا مع المسافة المقطوعة. عندما تكون الأمواج لا تزال قريبة من الثقوب، تكون قوتها 1 تقريبًا؛ أي أنها تضغط على جسم ما وتمدده بما يعادل حجمه تقريبًا؛ سيقتل البشر بسبب التمدد والانضغاط القويين. ومع ذلك، عندما تصل الموجات إلى الأرض، تقل قوتها إلى ما يقرب من ($1/30$ من محيط الثقوب) / (المسافة التي قطعتها الموجات) ¹. بالنسبة إلى الثقوب التي يبلغ وزنها نحو 10 أضعاف وزن الشمس وتكون على بُعد مليار سنة ضوئية، تبلغ قوة الموجة ($30 / 1$) $\times$ (180 كيلومترًا لمحيط الأفق) / (مليار سنة ضوئية للمسافة إلى الأرض) $\sim 10^{-21}$. ولذلك فإن الموجات تشوه محيطات الأرض بمقدار $10^{-21} \times (10^{-7} \text{ أمتار لحجم الأرض}) = 10^{-14}$ متر، أو 10 أضعاف قطر النواة الذرية.

ومن الميؤوس منه تمامًا التفكير في قياس مثل هذا المد والجزر الصغيرين على محيط الأرض المضطرب. ومع ذلك، فإن احتمالات قياس قوى المد والجزر لموجة الجاذبية ليست ميؤوسًا منها تمامًا باستخدام أداة مختبرية مصممة بعناية - كاشف موجات الجاذبية.

القضبان

كان جوزيف فيير أول شخص يتمتع ببصيرة كافية ليدرك أن محاولة اكتشاف موجات الجاذبية ليست ميؤوسًا منها تمامًا. تخرج فيير في الأكاديمية البحرية في عام 1940 وحصل على درجة البكالوريوس في الهندسة، وخدم في الحرب العالمية الثانية على متن حاملة الطائرات ليكسينجتون، حتى غرقها في معركة بحر المرجان، ثم أصبح ضابطًا قائدًا لقناصة الغواصات رقم 690؛ وكان قائدًا للعميد ثيودور روزفلت الابن و1900 جندي إلى الشاطئ في غزو إيطاليا عام 1943. بعد الحرب أصبح رئيسًا لقسم الإجراءات

المضادة للإلكترونية في مكتب السفن التابع للبحرية الأمريكية. كانت سمعته في إتقان تكنولوجيا الراديو والرادار عظيمة جداً لدرجة أنه في عام 1948 عُرض عليه منصب أستاذ متفرغ للهندسة الكهربائية في جامعة ماريلاند وقبّله -أستاذ متفرغ في سن التاسعة والعشرين، ولم يكن لديه أي تعليم جامعي أكثر من درجة البكالوريوس.

في أثناء تدريس الهندسة الكهربائية في ولاية ماريلاند، استعد فيبر لتغيير مهنته: فقد عمل للحصول على درجة الدكتوراه وأكملها. حصل على درجة الدكتوراه في الفيزياء من الجامعة الكاثوليكية، جزئياً تحت إشراف نفس الشخص الذي كان يشرف على درجة الدكتوراه لجون ويلر؛ كارل هيرزفيلد. تعلم فيبر من هيرزفيلد ما يكفي عن فيزياء الذرات والجزيئات والإشعاع ليخترع في عام 1951، نسخة واحدة من الآلية التي يعمل بها الليزر، لكنه لم يكن لديه الموارد اللازمة لإثبات مفهومه تجريبياً. بينما كان فيبر ينشر مفهومه، اخترعت مجموعتان بحثيتان أخريان، واحدة في جامعة كولومبيا بقيادة تشارلز تاونز والأخرى في موسكو بقيادة نيكولاي جيناديفيتش باسوف وألكسندر ميخائيلوفيتش بروخاروف، بشكل مستقل، نسخاً بديلة للآلية، ثم واصلت بناء الليزر العامل². على الرغم من أن بحث فيبر كان أول منشور عن الآلية، فإنه لم يحظَ بأي ثناء تقريباً؛ ذهبت جائزة نوبل وبراءات الاختراع إلى علماء كولومبيا وموسكو. بخيبة أمل، ولكن مع الحفاظ على صداقات وثيقة مع تاونز وباسوف، سعى فيبر إلى اتجاه بحثي جديد.

وكجزء من بحثه، أمضى فيبر عاماً في مجموعة جون ويلر، وأصبح خبيراً في النسبية العامة، وأجرى مع ويلر بحثاً نظرياً حول تنبؤات النسبية العامة لخصائص موجات الجاذبية. بحلول عام 1957، كان قد وجد اتجاهه الجديد. سيشرع في أول جهد في العالم لبناء جهاز للكشف عن موجات الجاذبية ومراقبتها.

خلال أواخر عام 1957، وعام 1958 بأكمله، وأوائل عام 1959، ناضل فيبر من أجل ابتكار كل مخطط يمكنه اكتشاف موجات الجاذبية. لقد كان هذا تمريناً بالقلم والورقة والقوة العقلية، وليس تجريبياً. لقد ملأ أربعة دفاتر ملاحظات، كل منها 300 صفحة، بالأفكار، والتصميمات المحتملة للكاشف، وحسابات الأداء المتوقع لكل تصميم. فكرة تلو الأخرى تخلى عنها باعتبارها غير واعدة. فشل التصميم تلو الآخر في إعطاء حساسية عالية. لكن القليل منها كان واعداً. ومن بينها، اختار فيبر في النهاية قضيباً أسطوانياً من الألومنيوم يبلغ طوله نحو مترين، وقطره نصف متر، ووزنه طناً، موجهاً نحو الموجات الواردة (الشكل 10.4 أدناه).

عندما تتأرجح قوة المد والجزر للأمواج، ينبغي أولاً أن تنضغط، ثم تتمدد، ثم تضغط أطراف هذا القضيب. يمتلك القضيب نمطاً طبيعياً من الاهتزاز يمكنه الاستجابة بشكل رنين لقوة المد والجزر المتأرجحة، وهو الوضع الذي تهتز فيه أطرافه للداخل وللخارج بالنسبة إلى مركزه. هذا الوضع الطبيعي، مثل رنين الجرس أو الشوكة الرنانة أو كأس النبيذ، له تردد محدد جيداً. تمامًا كما يمكن جعل الجرس أو الشوكة الرنانة أو كأس النبيذ يرن بشكل تأثري (تعاطفي) بواسطة موجات صوتية تتوافق مع تردده الطبيعي، كذلك يمكن جعل القضيب يهتز بشكل تأثري من خلال تذبذب قوى المد والجزر التي تتوافق مع تردده الطبيعي. لاستخدام مثل هذا القضيب ككاشف لموجات الجاذبية، يجب على المرء تعديل حجمه بحيث يتطابق تردده الطبيعي مع تردد موجات الجاذبية الواردة.

ما تردد موجات الجاذبية؟ في عام 1959، عندما شرع فيبر في هذا المشروع، كان عدد قليل من الناس يؤمنون بالثقوب السوداء (الفصل السادس)، ولم يفهم المؤمنون سوى القليل جداً عن خصائص الثقب. لم يتخيل أحد بعد ذلك أن الثقوب يمكن أن تتصادم وتتجمع وتطلق موجات من انحناء الزمكان مع تاريخ مشفر لتصادماتها. ولا يمكن لأي شخص أن يقدم الكثير من الإرشادات المفعممة بالأمل حول المصادر الأخرى لموجات الجاذبية.

لذلك شرع فيبر في محاولته وهو شبه أعمى. كان دليله الوحيد حجة بسيطة (ولكنها صحيحة) مفادها أن موجات الجاذبية من المحتمل أن تكون لها ترددات أقل من نحو 10000 هرتز (10000 دورة في الثانية) - وهذا هو التردد المداري لجسم يتحرك بسرعة الضوء (أسرع ما يمكن). حول النجم الأكثر إحكاماً الذي يمكن تصويره: نجم بحجم قريب من المحيط الحرج. لذا، صمم فيبر أفضل أجهزة الكشف الممكنة، سامحاً لترددات الرنين الخاصة بها بالهبوط أينما كانت أقل من 10000 هرتز، وأعرب عن أمله في أن يوفر الكون موجات بالترددات التي يختارها. كان محظوظاً. كانت ترددات الرنين لقضبانة نحو 1000 هرتز (1000 دورة تذبذب في الثانية)، واتضح أن بعض الموجات الناتجة عن اندماج الثقوب السوداء يجب أن تتأرجح عند مثل هذه الترددات تمامًا، كما يجب أن تتأرجح بعض الموجات الناتجة عن انفجارات المستعرات العظمى واندماج أزواج النجوم النيوترونية.

كان الجانب الأكثر تحدياً في مشروع فيبر هو اختراع جهاز استشعار لمراقبة اهتزازات

قضبانه. وتوقع أن تكون تلك الاهتزازات الناجمة عن الموجات صغيرة جداً: أصغر من قطر نواة الذرة [لكنه لم يكن يعرف، في الستينيات، مدى صغر حجمها: فقط $10^{-21} \times$ (طول قضبانته التي تبلغ مترين) 10^{-21} متر أو جزء من المليون من قطر نواة الذرة، وفقاً لتقديرات أحدث]. بالنسبة إلى معظم الفيزيائيين في أواخر الخمسينيات والستينيات من القرن العشرين، بدا حتى عُشر قطر النواة الذرية أمراً مستحيل القياس. ليس الأمر كذلك بالنسبة إلى فير. لقد اخترع جهاز استشعار على مستوى المهمة.



10.4 جوزيف فير، يوضح البلورات التي تنتج الكهرباء بفعل الضغط الملتصقة حول منتصف قضيب الألومنيوم الخاص به؛ كاليفورنيا. 1973. من المفترض أن تحرك موجات الجاذبية اهتزازات القضيب من طرف إلى طرف، ويجب أن تضغط هذه الاهتزازات على البلورات للداخل والخارج بحيث تنتج جهوداً متذبذبة يمكن اكتشافها إلكترونياً.
[تصوير جيمس ب. بلير، بإذن من جمعية ناشيونال جيوغرافيك].

كان مستشعر فيبر يعتمد على تأثير إنتاج الكهرباء بفعل الضغط، حيث تُنتج أنواع معينة من المواد (بعض البلورات والسيراميك)، عند ضغطها قليلاً، جهداً كهربائياً من طرف إلى آخر. كان فيبر يود أن يصنع قضيبه من مثل هذه المادة، لكن هذه المواد كانت باهظة الثمن للغاية، لذلك فعل الشيء التالي الأفضل: صنع قضيبه من الألومنيوم، ثم لصقَ بلورات إنتاج الكهرباء بفعل الضغط حول منتصف القضيب (الشكل 10.4). عندما يهتز القضيب، يضغط سطحه على البلورات ويمدها، وتنتج كل بلورة جهداً متذبذباً، ويربط فيبر البلورات معاً واحدة تلو الأخرى في دائرة كهربائية بحيث تضاف جهودها المتذبذبة الصغيرة إلى جهد كبير بما يكفي للكشف الإلكتروني. حتى عندما كانت اهتزازات القضيب تبلغ عُشر قطر نواة الذرة فقط.

في أوائل الستينيات من القرن العشرين، كان فيبر شخصية وحيدة، وهو الفيزيائي التجريبي الوحيد في العالم الذي يبحث عن موجات الجاذبية. ومع مرارة المنافسة لإنتاج الليزر، استمتع بالوحدة. ومع ذلك، في أوائل سبعينيات القرن العشرين، اجتذبت حساسيته المثيرة للإعجاب وأدلته على أنه قد يكون في الواقع يكتشف الموجات (لديّ قناعة كونتها لاحقاً بأنها لم تكن كذلك) العشرات من التجريبيين الآخرين، وبحلول الثمانينيات، شارك أكثر من مائة من التجريبيين الموهوبين في منافسة معه لجعل علم فلك موجات الجاذبية حقيقة واقعة.

التقيت بفيفر لأول مرة على أحد التلال المقابلة لجبل مونت بلانك في جبال الألب الفرنسية، في صيف عام 1963، بعد أربع سنوات من شروعه في مشروعه للكشف عن موجات الجاذبية. كنت طالب دراسات عليا، وبدأت للتو البحث في النسبية، ومع خمسة وثلاثين طالباً آخر من جميع أنحاء العالم أتيت إلى جبال الألب لحضور مدرسة صيفية مكثفة مدتها شهران تركز فقط على قوانين النسبية العامة لأينشتاين في الجاذبية. كان مدرسوننا أعظم خبراء النسبية في العالم -جون ويلر، وروجر بنروز، وتشارلز ميسنر، وبريس ديوييت، وجوزيف فيبر، وآخرون- وقد تعلمنا منهم في المحاضرات والمحادثات الخاصة، مع الثلوج المتلاثلة في نهر أجيل دي ميدي ومونت بلانك. شاهقة في السماء فوقنا، والأبقار ذات الأجراس ترعى في المراعي الخضراء الرائعة من حولنا، وقرية ليه هوشز الخلافة على بُعد عدة مئات من الأمتار أسفلنا، عند سفح تل مدرستنا.

في هذا المكان الرائع، ألقى فيبر محاضرة عن موجات الجاذبية ومشروعه للكشف عنها، واستمعت إليها منبهراً. بين المحاضرات، تحدثنا أنا فيبر عن الفيزياء، والحياة، وتسلق

الجمال، وأصبحت أعتبره شقيق روح. كنا على حد سواء وحيدين. ولم يتمتع أي منا بروح المنافسة الشديدة أو الأخذ والعطاء الفكري القوي. لقد فضل كلانا أن نتصارع مع مشكلة ما بمفردنا، ونطلب النصائح والأفكار من حين لآخر من الأصدقاء، ولكن من دون أن نتعرض لضربات من الآخرين الذين كانوا يحاولون سبقتنا إلى رؤية أو اكتشاف جديد.

على مدى العقد التالي، مع تزايد سخونة الأبحاث حول الثقوب السوداء ودخولها عصرها الذهبي (الفصل السابع)، بدأت أجد الأبحاث المتعلقة بالثقوب السوداء مقبولة، فهي شديدة الكثافة، وثمة منافسة شديدة، وكثير من الخسونة والتعثر. لذلك بحثت عن مجال بحثي آخر، مجال به مساحة أكبر، حيث يمكنني أن أبذل فيه معظم جهدي في حين لا أزال أعمل على الثقوب السوداء وأشياء أخرى أمنحها بعض وقتي. استوحيت من فيبر واخترت موجات الجاذبية.

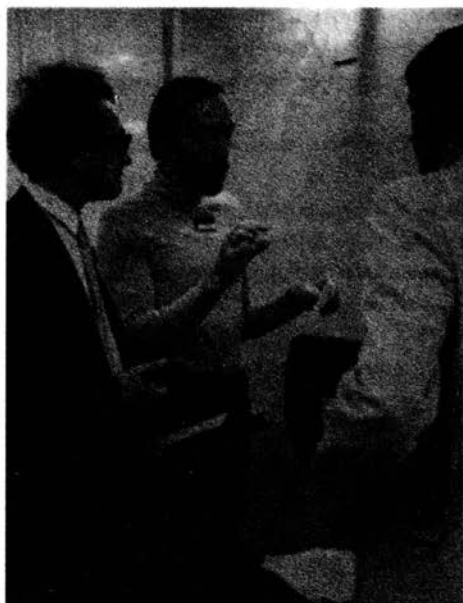
مثل فيبر، رأيت موجات الجاذبية باعتبارها مجالاً بحثياً ناشئاً وله مستقبل مشرق. من خلال دخول هذا المجال في بداياته، كان بإمكانني الاستمتاع بالمساعدة في تشكيله، ويمكنني وضع الأسس التي سيبنى عليها الآخرون لاحقاً، ويمكنني القيام بذلك من دون أن يحشر الآخرون أنوفهم في رقبتني، حيث كان معظم منظري النسبية الآخرين يركزون آنذاك على الثقوب السوداء.

بالنسبة إلى فيبر، كانت الأسس التجريبية الموضوعية هي: الاختراع والبناء والتحسين المستمر لأجهزة الكشف. بالنسبة إليّ، كانت تلك الأمور النظرية هي: محاولة فهم ما تقوله قوانين الجاذبية لأينشتاين حول كيفية إنتاج موجات الجاذبية، وكيف تضغط على مصادرها عندما تغادر، وكيف تنتشر؛ محاولة معرفة أنواع الأجسام الفلكية التي ستنتج أقوى موجات الكون، ومدى قوة موجاتها، وبأي ترددات ستأرجح؛ اختراع أدوات رياضية لحساب تفاصيل السيمفونيات المشفرة التي تنتجها هذه الأشياء، لذلك عندما يكتشف فيبر وآخرون الموجات في نهاية المطاف، يمكن مقارنة النظرية والتجربة.

في عام 1969 قضيت ستة أسابيع في موسكو، بدعوة من زيلدوفيتش. في أحد الأيام، توقف زيلدوفيتش عن إيطاري أنا والآخريين بأفكار جديدة (الفصلان السابع والثاني عشر)، وقادني إلى جامعة موسكو ليقدمني إلى عالم الفيزياء التجريبي الشاب، فلاديمير براجينسكي. كان براجينسكي، الذي حفزه فيبر، يعمل لعدة سنوات على تطوير تقنيات

للكشف عن موجات الجاذبية. وكان أول مجرب بعد فيبر يدخل هذا المجال. وكان أيضًا في خضم تجارب أخرى رائعة: البحث عن الكواركات (وحدة بناء أساسية من البروتونات والنيوترونات)، وتجربة لاختبار تأكيد أينشتاين أن جميع الأجسام، بصرف النظر عن تركيبها، تسقط بنفس التسارع في مجال الجاذبية (وهو التأكيد الذي يكمن وراء وصف أينشتاين للجاذبية على أنها انحناء الزمكان).

كنت منبهراً. كان براجينسكي ذكياً وعميقاً وكان يتمتع بذوق ممتاز في الفيزياء؛ وكان ودوداً وصريحاً، وكان من السهل التحدث معه عن السياسة كما عن العلوم. وسرعان ما أصبحنا صديقين مقربين وتعلمنا احترام وجهات نظر بعضنا حول العالم. بالنسبة إليّ، كديمقراطي ليبرالي في الطيف الأمريكي، كانت حرية الفرد لها الأولوية فوق كل الاعتبارات الأخرى. لا ينبغي أن يكون لأي حكومة الحق في أن تملي على المرء كيف يعيش حياته. بالنسبة إلى براجينسكي، الشيوعي غير العقائدي، كانت مسؤولية الفرد تجاه المجتمع ذات أهمية قصوى. نحن حراس إخواننا، وحسناً، يجب أن نكون في عالم يمكن فيه للأشرار مثل جوزيف ستالين السيطرة إذا لم نكن يقظين.



جوزيف فيبر وكيب ثورن وتوني تايسون في مؤتمر حول إشعاع الجاذبية في وارسو، بولندا، سبتمبر 1973. [تصوير ماريك هولزمن، بإذن من أندريه تراوتمان].



فلاديمير براجينسكي وكيث ثورن، في باسادينا، كاليفورنيا، أكتوبر 1984.
[الصورة مقدمة من فالتين رودينكو].

كان براجينسكي يتمتع ببصيرة لا يمتلكها أي شخص آخر. خلال اجتماعنا عام 1969، ثم مرة أخرى في عامي 1971 و 1972، حذرني من أن القضبان المستخدمة للبحث عن موجات الجاذبية لها قيود أساسية ونهائية. وأخبرني أن هذا القيد يأتي من قوانين الميكانيكا الكمومية. على الرغم من أننا نفكر عادة في الميكانيكا الكمومية باعتبارها تحكم الأجسام الصغيرة مثل الإلكترونات والذرات والجزيئات، إذا أجرينا قياسات دقيقة بما فيه الكفاية على اهتزازات قضيب وزنه طن واحد، يجب أن نرى أن هذه الاهتزازات تتصرف بتأثير الميكانيكا الكمومية، والميكانيكا الكمومية التي ستصرف وفقاً لها ستؤدي في النهاية إلى حدوث مشكلات في الكشف عن موجات الجاذبية. أقنع براجينسكي نفسه بهذا من خلال حساب الأداء النهائي لبلورات فيبر التي تنتج الكهرباء بفعل الضغط والعديد من أنواع أجهزة الاستشعار الأخرى التي يمكن للمرء استخدامها لقياس اهتزازات القضيب.

لم أفهم ما الذي كان يتحدث عنه براجينسكي؛ لم أفهم منطقته، ولم أفهم استنتاجه، ولم أفهم أهميته، ولم أوله الكثير من الاهتمام. بدت الأشياء الأخرى التي كان يعلمني إياها أكثر أهمية: منه كنت أتعلم كيفية التفكير في التجارب، وكيفية تصميم الأجهزة التجريبية، وكيفية التنبؤ بالشوشرة التي ستصيب الجهاز، وكيفية محو الشوشرة حتى ينجح الجهاز في مهمته -ومني، كان براجينسكي يتعلم كيفية التفكير في قوانين الجاذبية لأينشتاين، وكيفية التعرف على تنبؤاتها. لقد أصبحنا فريقاً سريعاً، حيث جلب كل واحد منا خبرته الخاصة إلى مشروعنا المشترك؛ وعلى مدى العقدين التاليين، سنحظى معاً بمتعة كبيرة ونقوم ببعض الاكتشافات.

في كل عام، في أوائل ومنتصف السبعينيات، عندما كان يرى أحدنا الآخر في موسكو أو باسادينا أو كوبنهاجن أو روما أو في أي مكان آخر، كان براجينسكي يكرر تحذيره بشأن مشكلة الميكانيكا الكمومية التي تواجه كواشف موجات الجاذبية، وفي كل عام لم أكن أفهم مرة أخرى. وكان تحذيره مشوشاً إلى حد ما لأنه هو نفسه لم يفهم تمامًا ما يجري. ومع ذلك، في عام 1976، بعد أن تمكن براجينسكي، وبشكل مستقل روبن جيفارد في جامعة ستانفورد، من جعل التحذير أكثر وضوحاً، فهمت فجأة. لقد كان التحذير جدياً، وأدركت أخيراً أن الحساسية النهائية لكاشف القضيب محدودة بشدة بمبدأ عدم اليقين.

مبدأ عدم اليقين هو سمة أساسية لقوانين الميكانيكا الكمومية. ينص على أنه إذا أجريت قياساً دقيقاً للغاية لتموضع جسم ما، فمن المؤكد أنك ستركل الجسم في أثناء عملية القياس، مما يؤدي إلى اضطراب سرعة الجسم بطريقة عشوائية وغير متوقعة. كلما كان قياس التموضع أكثر دقة، زادت قوة اضطراب سرعة الجسم وعدم القدرة على التنبؤ به. بصرف النظر عن مدى ذكائك في تصميم القياس الخاص بك، لا يمكنك التحايل على عدم اليقين الفطري هذا. (انظر الإطار 10.2).

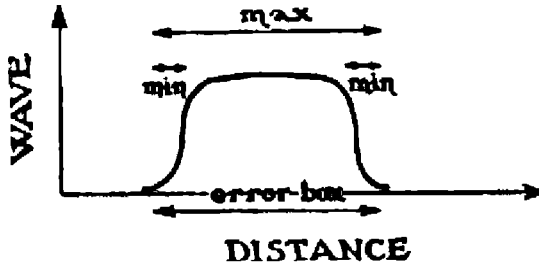
الإطار 10.2

مبدأ عدم اليقين وازدواجية الموجة / الجسيم

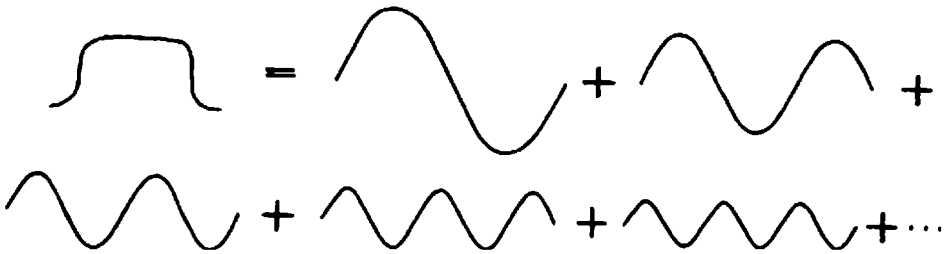
يرتبط مبدأ عدم اليقين ارتباطاً وثيقاً بازدواجية الموجة / الجسيم (الإطار 4.1) -أي بميل الجسيمات إلى التصرف أحياناً مثل الموجات وأحياناً مثل الجسيمات.

إذا قُست تموضع جسيم (أو أي جسم آخر، على سبيل المثال، نهاية قضيب) وعلمت

أنه موجود في مكان ما داخل مربع خطأ ما، فبصرف النظر عن الشكل الذي قد تبدو عليه موجة الجسيم قبل القياس، في أثناء القياس، فإن جهاز القياس سوف «يركل» الموجة وبالتالي يحصرها داخل إطار صندوق الخطأ. وبذلك تكتسب الموجة شكلاً محصوراً يشبه ما يلي:



تحتوي هذه الموجة المحصورة على العديد من الأطوال الموجية المختلفة، بدءاً من حجم الصندوق نفسه (المشار إليه بـ max أعلاه) إلى الحجم الصغير للزوايا التي تبدأ عندها الموجة وتنتهي بها (المشار إليها بـ min). وبشكل أكثر تحديداً، يمكن إنشاء الموجة المحصورة عن طريق إضافة الموجات التذبذبية التالية، والتي لها أطوال موجية تتراوح من الحد الأقصى max إلى الحد الأدنى min:



الآن، تذكر أنه كلما كان الطول الموجي لاهتزازات الموجة أقصر، زادت طاقة الجسيم، وبالتالي زادت سرعة الجسيم أيضاً. وبما أن القياس أعطى الموجة نطاقاً من الأطوال الموجية، فقد تكون طاقة الجسيم وسرعته الآن في أي مكان في النطاقات المقابلة؛ وبعبارة أخرى، فإن طاقتها وسرعتها غير مؤكدة.

للتلخيص، حصر القياس موجة الجسيم في مربع الخطأ (الرسم البياني الأول أعلاه)؛ مما يجعل الموجة تتكون من مجموعة من الأطوال الموجية (الرسم البياني الثاني)؛

يتوافق هذا النطاق من الأطوال الموجية مع نطاق من الطاقة والسرعة؛ وبالتالي فإن السرعة غير مؤكدة. بصرف النظر عن مدى صعوبة محاولتك، لا يمكنك تجنب إنتاج عدم اليقين في السرعة عند قياس تموضع الجسيم. بالإضافة إلى ذلك، عند فحص هذه السلسلة من الاستدلال بمزيد من التعمق، فإنك تتوقع أنه كلما كان قياسك أكثر دقة؛ أي كلما كان مربع الخطأ الخاص بك أصغر، زاد نطاق الأطوال الموجية والسرعة، وبالتالي زاد عدم اليقين في سرعة الجسيم.

لا يحكم مبدأ عدم اليقين قياسات الأجسام المجهرية مثل الإلكترونات والذرات والجزيئات فحسب؛ كما أنه يحكم قياسات الأجسام الكبيرة. ومع ذلك، نظرًا لأن الجسم الكبير لديه قصور ذاتي كبير، فإن ركلة القياس لن تؤثر على سرعته إلا قليلًا. (سيتناسب اضطراب السرعة عكسيًا مع كتلة الجسم).

ينص مبدأ عدم اليقين، عند تطبيقه على كاشف موجات الجاذبية، على أنه كلما كان المستشعر يقيس موضع نهاية أو جانب القضيب المهتز بشكل أكثر دقة، كان القياس أكثر قوة وعشوائية.

بالنسبة إلى مستشعر غير دقيق، يمكن أن تكون الركلة صغيرة وغير مهمة، ولكن نظرًا لأن المستشعر غير دقيق، فإنك لا تعرف جيدًا سعة اهتزازات القضيب، وبالتالي لا يمكنك مراقبة موجات الجاذبية الضعيفة.

للحصول على مستشعر دقيق للغاية، تكون الركلة هائلة جدًا لدرجة أنها تغير اهتزازات الشريط بقوة. وبالتالي فإن هذه التغيرات الكبيرة وغير المعروفة تخفي آثار أي موجة جاذبية قد تحاول اكتشافها.

في مكان ما بين هذين النقيضين توجد دقة مثالية للمستشعر: دقة ليست ضعيفة جدًا لدرجة أنك لا تتعلم سوى القليل، ولا كبيرة جدًا لدرجة أن الركلة التي لا يمكن التعرف عليها تكون قوية. عند هذه الدقة المثلى، والتي تسمى الآن الحد الكمومي القياسي لبراجينسكي، فإن تأثير الركلة يكاد لا يكون موهناً مثل الأخطاء التي يرتكبها المستشعر. لا يوجد مستشعر يمكنه مراقبة اهتزازات القضيب بشكل أكثر دقة من الحد الكمومي القياسي هذا. ما مدى صغر هذا الحد؟ وبالنسبة إلى قضيب يبلغ طوله مترين ويزن طنًا واحدًا، فهو أصغر بنحو 100000 مرة من نواة الذرة.

في ستينيات القرن العشرين، لم يفكر أحد جدًّا في الحاجة إلى مثل هذه القياسات الدقيقة، لأنه لم يكن أحد يفهم بوضوح مدى ضعف موجات الجاذبية الصادرة عن الثقوب السوداء والأجسام الفلكية الأخرى. ولكن بحلول منتصف السبعينيات، وبتشجيع من مشروع فيبر التجريبي، بدأت أنا وغيري من المنظرين في اكتشاف مدى القوة المحتملة لأقوى الموجات. كان الجواب تقريباً 10^{-21} (متران) فقط، أو نحو جزء من المليون من قطر نواة الذرة. إذا متران يهتز بسعة $10^{-21} \times$ (متران) فقط، أو نحو جزء من المليون من قطر نواة الذرة. إذا كانت هذه التقديرات صحيحة (وكنا نعلم أنها غير مؤكدة إلى حد كبير)، فإن إشارة موجة الجاذبية ستكون أصغر بعشر مرات من الحد الكمومي القياسي لبراجينسكي، وبالتالي لا يمكن اكتشافها باستخدام قضيب أو أي نوع معروف من أجهزة الاستشعار.

وعلى الرغم من أن هذا مقلق للغاية، فإننا لم نخسر كل شيء. أخبره حدس براجينسكي العميق أنه إذا كان المجربون أذكاء بشكل خاص، يجب أن يكونوا قادرين على التحايل على الحد الكمومي القياسي. وقال إنه يجب أن تكون هناك طريقة جديدة لتصميم جهاز استشعار، بحيث لا تخفي ركلته غير المعروفة والتي لا يمكن تجنبها تأثير موجات الجاذبية على القضيب. وقد أطلق براجينسكي على هذا المستشعر اسم اللاهدم الكمومي³؛ «الكمومي» لأن ركلة المستشعر مطلوبة بموجب قوانين الميكانيكا الكمومية، «اللاهدم» لأن المستشعر سيتكون بحيث لا تؤدي الركلة إلى تدمير الشيء الذي نحاول قياسه؛ أي تأثير الموجات على القضيب. لم يكن لدى براجينسكي تصميم عملي لمستشعر كمومي لاهدمي، لكن حدسه أخبره أن مثل هذا المستشعر يجب أن يكون ممكناً.

هذه المرة استمعت بعناية. وعلى مدار العامين التاليين، كافحت أنا ومجموعتي في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا وبراجينسكي ومجموعته في موسكو، بشكل متقطع، لابتكار جهاز استشعار كمومي لاهدمي.

لقد عثر كلانا على الإجابة في وقت واحد في خريف عام 1977، ولكن بطرق مختلفة تماماً. أتذكر بوضوح مدى حماسي عندما طرأت الفكرة على كارلتون كيفز وأنا في أثناء مناقشة مكثفة على الغداء في جرياسي (كافيتريا طلاب معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا). وأتذكر الطعم الحلو والمر عندما علمت أن براجينسكي ويوري فورونتسوف وفرهيد خليلي كانت لديهم قطعة كبيرة من نفس الفكرة في موسكو في نفس الوقت بشكل أساسي -مرير لأنني أشعر بارتياح كبير لكوني أول من اكتشف شيئاً جديداً؛ لطيف لأنني

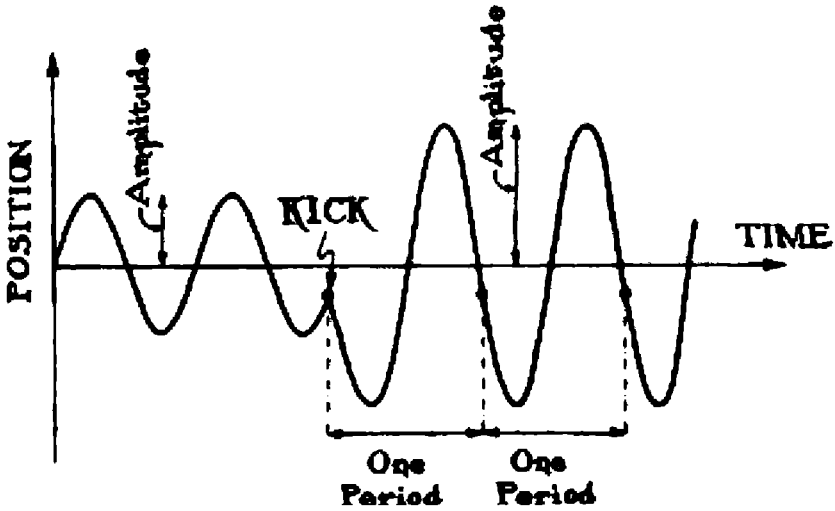
مغرم جداً ببراجينسكي وبالتالي أستمتع بمشاركة الاكتشافات معه.

إن فكرتنا الكاملة للاهدم الكمومي هي فكرة مجردة إلى حد ما وتسمح بمجموعة واسعة من تصميمات أجهزة الاستشعار للتحايل على الحد الكمومي القياسي لبراجينسكي. ومع ذلك، فإن تجريد الفكرة يجعل من الصعب شرحها، لذا سأصف هنا مثالاً واحداً فقط (ليس عملياً جداً) لجهاز استشعار كمومي لا هدمي. وقد أطلق براجينسكي على هذا المثال اسم المستشعر الاستروبوسكوبي.

يعتمد المستشعر الاستروبوسكوبي على خاصية مميزة لاهتزازات القضيب: إذا ركل القضيب ركلة حادة جداً وغير معروفة، فإن سعة اهتزازة ستتغير، ولكن بصرف النظر عن تغير السعة، فإن فترة واحدة من التذبذب على وجه التحديد بعد الركلة ستتغير. سيعود الطرف المهتز للقضيب إلى نفس الوضع الذي كان عليه في لحظة الركلة (النقاط السوداء في الشكل 10.5). وهذا صحيح على الأقل إذا لم تضغط موجة الجاذبية (أو أي قوة أخرى) أو تمدد الشريط في هذه الأثناء. إذا ضغطت موجة (أو قوة أخرى) على الشريط في هذه الأثناء، فسيغير تموضع القضيب بعد فترة واحدة.

ومن أجل الكشف عن الموجة، ينبغي بناء جهاز استشعار يُجري قياسات استروبوسكوبية للأطراف المهتزة للقضيب، وهو جهاز استشعار يقيس تموضع نهايات القضيب بسرعة مرة واحدة في كل فترة من الاهتزاز. سيركل هذا المستشعر القضيب في كل قياس، لكن الركلات لن تغير موضع نهايات القضيب في أوقات القياسات اللاحقة. إذا وجد أن التموضع قد تغير، فمن المؤكد أن موجة الجاذبية (أو أي قوة أخرى) قد ضغطت على القضيب.

على الرغم من أن أجهزة الاستشعار الكمومية اللا هدمية قد حلت مشكلة الحد الكمومي القياسي لبراجينسكي، فإنني بحلول منتصف الثمانينيات من القرن العشرين، كنت قد أصبحت متشائماً إلى حد ما بشأن احتمالات نجاح أجهزة الكشف القضيبيية في تحقيق نتائج علم فلك موجات الجاذبية. كان لتشاؤمي سببان.



10.5 المبدأ الكامن وراء قياس اللاهدم الكمومي الاستروبوسكوبي. يرسم موضع نهاية الشريط المهتز عمودياً؛ المرسوم أفقياً هو الزمن. إذا أُجري قياس سريع ودقيق للغاية للموضع في الوقت المحدد بركلة، فإن المستشعر الذي يقيس سير كل القضيب ركلة مفاجئة غير معروفة، وبالتالي يغير سعة اهتزاز القضيب بطريقة غير معروفة. ومع ذلك، لن يكون هناك أي تغيير في موضع نهاية القضيب بعد فترة واحدة من الركلة، أو فترتين، أو ثلاث فترات. ستكون هذه الأوضاع هي نفسها التي كانت عليها في وقت الركلة وستكون مستقلة تماماً عن الركلة.

أولاً، على الرغم من أن القضبان التي بناها فيبر وبراجينسكي وآخرون قد حققت حساسيات أفضل بكثير مما كان يحلم به أي شخص في الخمسينيات من القرن الماضي، فإنها كانت لا تزال قادرة على اكتشاف موجات بقوة 10^{-17} أو أكبر فقط. وكان هذا أقل من أن ينجح بعشرة آلاف مرة، إذا كنت أنا وآخرون قد قدرنا قوة الموجات التي تصل إلى الأرض بشكل صحيح. ولم يكن هذا في حد ذاته أمراً جدياً، نظرًا لأن مسيرة التكنولوجيا غالبًا ما أنتجت تحسينات بمقدار 10000 كسر في الأدوات على مدى عشرين عامًا أو أقل. [أحد الأمثلة على ذلك هو الدقة الزاوية لأفضل التلسكوبات الراديوية، والتي تحسنت من عشرات الدرجات في منتصف الأربعينيات إلى بضع ثوانٍ قوسية في منتصف الستينيات (الفصل التاسع). والسبب الآخر هو حساسية كواشف الأشعة السينية الفلكية، التي تحسنت بمعامل 10^{10} بين عامي 1958 و1978؛ أي بمعدل متوسط قدره 10000

كل ثماني سنوات (الفصل الثامن)]. ومع ذلك، فإن معدل التحسن في القضبان كان بطيئاً للغاية، وكانت توقعات التكنولوجيا والتقنيات المستقبلية متواضعة للغاية، بحيث لا يبدو أن هناك طريقة معقولة لتحقيق تحسين بمقدار 10000 كسر في المستقبل المنظور. وبالتالي، من المرجح أن يتوقف النجاح على أن تكون الموجات أقوى من تقديرات 10^{-21} وهو احتمال حقيقي، ولكن ليس من دواعي سرور أي شخص الاعتماد عليه.

ثانياً، حتى لو نجحت القضبان في اكتشاف موجات الجاذبية، فإنها ستواجه صعوبة هائلة في فك تشفير الإشارات السيمفونية للموجات، ومن المحتمل أن تفشل في الواقع. كان السبب بسيطاً: تماماً كما تستجيب الشوكة الرنانة أو كأس النبيذ بشكل تأثري فقط للصوت الذي يكون تردده قريباً من ترددها الطبيعي، كذلك لن يستجيب القضيب إلا لموجات الجاذبية التي يكون ترددها قريباً من التردد الطبيعي للقضيب، بلغة التكنولوجيا، يمتلك كاشف القضيب نطاقاً ترددياً ضيقاً (عرض النطاق الترددي هو نطاق الترددات الذي يستجيب له). لكن المعلومات السيمفونية للموجات ينبغي عادةً تشفيرها في نطاق واسع جداً من الترددات. ومن ثم، فإن استخراج معلومات الموجات يتطلب «إكسيليفوناً» مكوناً من العديد من القضبان، يغطي كل منها جزءاً صغيراً ومختلفاً من ترددات الإشارة. كم عدد القضبان في الإكسيليفون؟ بالنسبة إلى أنواع القضبان التي يخطط لها ثم يجري إنشاؤها، هناك عدة آلاف، وهو عدد كبير جداً بحيث لا يمكن تطبيقه عملياً. من حيث المبدأ، سيكون من الممكن توسيع النطاق الترددي للقضبان، وبالتالي التعامل مع عشرات القضبان، على سبيل المثال، ولكن القيام بذلك سيتطلب تقدماً تقنياً كبيراً يتجاوز تلك الخاصة بالوصول إلى حساسية تبلغ 10^{-21} .

على الرغم من أنني لم أتحادث كثيراً علناً في الثمانينيات عن نظرتي المتشائمة، فإنني كنت أعتبرها في السر مأساوية بسبب الجهد الكبير الذي بذله فير وبراجينسكي وأصدقائي وزملائي الآخرون في القضبان، وأيضاً لأنني أصبحت مقتنعة بأن إشعاع الجاذبية لديه القدرة على إحداث ثورة في معرفتنا بالكون.

LIGO

مرصد موجات الجاذبية باستخدام التداخل الليزري

لفهم الثورة التي قد يجلبها اكتشاف موجات الجاذبية وفك شفرتها، دعونا نذكر تفاصيل الثورة السابقة: تلك التي أحدثها تطور الأشعة السينية والتلسكوبات الراديوية (الفصلان الثامن والتاسع).

في ثلاثينيات القرن العشرين، قبل ظهور علم الفلك الراديوي وعلم فلك الأشعة السينية، كانت معرفتنا بالكون تأتي بالكامل تقريباً من الضوء. أظهر الضوء أنه كون هادئ وهامد، كون تهيمن عليه النجوم والكواكب التي تتحرك بسلاسة في مداراتها، وتتألق بثبات وتتطلب ملايين أو مليارات السنين لتتغير بطرق يمكن إدراكها.

تحطمت هذه النظرة الهادئة للكون في الخمسينيات والستينيات والسبعينيات من القرن العشرين، عندما أظهرت لنا موجات الراديو والأشعة السينية الجانب العنيف للكون: نفاثات مقذوفة من أنوية المجرة، ونجوم زائفة ذات لمعان متقلب أكثر سطوعاً بكثير من مجرتنا، النجوم النابضة ذات الأشعة الشديدة التي تشرق على أسطحها وتدور بسرعات عالية. ألمع الأجسام التي شاهدتها التلسكوبات البصرية كانت الشمس والكواكب وبعض النجوم القريبة الهادئة. كانت ألمع الأجسام التي شاهدتها التلسكوبات الراديوية عبارة عن انفجارات عنيفة في قلب المجرات البعيدة، مدعومة (على الأرجح) بثقوب سوداء عملاقة. ألمع الأجسام التي شاهدتها تلسكوبات الأشعة السينية كانت عبارة عن ثقوب سوداء صغيرة ونجوم نيوترونية تتراكم الغازات الساخنة بسبب ترافقها الثنائي.

ماذا عن موجات الراديو والأشعة السينية التي مكنتهم من خلق مثل هذه الثورة المذهلة؟ كان المفتاح هو حقيقة أنهما جلبتا لنا أنواعاً مختلفة تماماً من المعلومات عما يجلبه الضوء: الضوء، بطوله الموجي الذي يبلغ نصف ميكرون، ينبعث بشكل أساسي من الذرات الساخنة الموجودة في الغلاف الجوي للنجوم والكواكب، وهكذا علمنا عن تلك الأجواء. انبعثت موجات الراديو، بأطوالها الموجية الأكبر بمقدار 10 ملايين مرة، في المقام الأول عن طريق إلكترونات قريبة من سرعة الضوء تتصاعد في المجالات المغناطيسية، وبالتالي عرّفنا بالنفاثات الممغنطة التي تنطلق من أنوية المجرة،

وعن الفصوص الممغنطة العملاقة بين-المجري التي تغذي النفاثات، والحزم الممغنطة من النجوم النابضة. لقد أنتجت الأشعة السينية، بأطوال موجية أقصر بآلاف المرات من الضوء، في الغالب بواسطة إلكترونات عالية السرعة في غاز شديد السخونة، تراكم على الثقوب السوداء والنجوم النيوترونية، وبالتالي علمتنا بشكل مباشر عن الغاز المتراكم وبشكل غير مباشر عن الثقوب والنجوم النيوترونية.

إن الاختلافات بين الضوء من ناحية، وموجات الراديو والأشعة السينية من ناحية أخرى، تعتبر باهتة مقارنة بالاختلافات بين الموجات الكهرومغناطيسية (الضوء، والراديو، والأشعة تحت الحمراء، والأشعة فوق البنفسجية، والأشعة السينية، وأشعة جاما) وعلم الفلك الحديث وموجات الجاذبية. وفي المقابل، قد تُحدث موجات الجاذبية ثورة في فهمنا للكون أكثر من موجات الراديو والأشعة السينية. ومن بين الاختلافات بين الموجات الكهرومغناطيسية وموجات الجاذبية ونتائجها ما يلي⁶:

- ينبغي أن تنبعث موجات الجاذبية بقوة أكبر من خلال اهتزازات متماسكة وواسعة النطاق لانحناء الزمكان (على سبيل المثال، اصطدام ثقبين أسودين واندماجهما)، ومن خلال حركات متماسكة واسعة النطاق لكميات هائلة من المادة (على سبيل المثال، الانفجار الداخلي لقلب النجم الذي يؤدي إلى حدوث مستعر أعظم، أو اندماج والتحام نجمين نيوترونيين يدور أحدهما حول الآخر). ولذلك، ينبغي أن تُظهر لنا موجات الجاذبية حركات الانحناءات الضخمة والكتل الضخمة. على النقيض من ذلك، عادةً ما تنبعث الموجات الكهرومغناطيسية الكونية منفردة ومنفصلة عن طريق أعداد هائلة من الذرات أو الإلكترونات الفردية والمنفصلة؛ وهذه الموجات الكهرومغناطيسية الفردية، التي تتأرجح كل منها بطريقة مختلفة قليلاً، ثم تتراكب مع بعضها لإنتاج الموجة الإجمالية التي يقيسها عالم الفلك. ونتيجة لذلك، من الموجات الكهرومغناطيسية نتعلم في المقام الأول عن درجة الحرارة والكثافة والمجالات المغناطيسية التي تتعرض لها الذرات والإلكترونات المنبعثة.

- تنبعث موجات الجاذبية بقوة أكبر في مناطق المكان حيث تكون الجاذبية شديدة للغاية بحيث يفشل وصف نيوتن ويجب استبدال وصف أينشتاين به، وحيث تتحرك كميات هائلة من المادة أو انحناء الزمكان أو تهتز أو تدور بسرعة قريبة من

سرعة الضوء. ومن الأمثلة على ذلك أصل الانفجار الأعظم للكون، واصطدامات الثقوب السوداء، ونبضات النجوم النيوترونية حديثة الولادة في مراكز انفجارات المستعرات العظمى. وبما أن هذه المناطق ذات الجاذبية القوية عادة ما تكون محاطة بطبقات سميقة من المادة التي تمتص الموجات الكهرومغناطيسية (ولكنها لا تمتص موجات الجاذبية)، فإن مناطق الجاذبية القوية لا يمكنها أن ترسل لنا موجات كهرومغناطيسية. وعلى النقيض من ذلك، فإن الموجات الكهرومغناطيسية التي يراها علماء الفلك تأتي بالكامل تقريباً من مناطق الجاذبية الضعيفة والسرعة المنخفضة؛ على سبيل المثال، أسطح النجوم والمستعرات العظمى.

تشير هذه الاختلافات إلى أن الأجسام التي قد ندرس سيمفونياتها باستخدام كواشف موجات الجاذبية ستكون غير مرئية إلى حد كبير باستخدام الضوء، وموجات الراديو، والأشعة السينية؛ والأشياء التي يدرسها علماء الفلك الآن في الضوء وموجات الراديو والأشعة السينية ستكون غير مرئية إلى حد كبير في موجات الجاذبية. وبالتالي يجب أن يبدو الكون بفعل الجاذبية مختلفاً تماماً عن الكون الكهرومغناطيسي؛ من موجات الجاذبية يجب أن نتعلم أشياء لن نتعلمها أبداً من الناحية الكهرومغناطيسية. ولهذا السبب من المرجح أن تُحدث موجات الجاذبية ثورة في فهمنا للكون.

يمكن القول إن فهمنا الحالي للكون القائم على الكهرومغناطيسية مكتمل جداً مقارنةً بالفهم البصري في ثلاثينيات القرن العشرين، حيث إن ثورة موجات الجاذبية ستكون أقل إثارة بكثير مما كانت عليه ثورة الموجات الراديوية/الأشعة السينية. وهذا يبدو لي غير محتمل. إنني أدرك بشكل مؤلم افتقارنا إلى الفهم عندما أفكر في الحالة المؤسفة للتقديرات الحالية لموجات الجاذبية التي تغمر الأرض. بالنسبة إلى كل نوع من مصادر موجات الجاذبية التي فكرنا فيها، باستثناء النجوم الثنائية واندماجاتها، إما أن قوة موجات المصدر لمسافة معينة من الأرض غير مؤكدة بعدة عوامل تبلغ 10، أو معدل حدوث هذا النوع من المصدر (وبالتالي أيضاً المسافة إلى أقرب مصدر) غير مؤكد بعدة عوامل من 10، أو أن وجود المصدر ذاته غير مؤكد.

تسبب هذه الشكوك إحباطاً كبيراً في تخطيط وتصميم أجهزة الكشف عن موجات الجاذبية. هذا هو الجانب السلبي. الجانب الإيجابي هو حقيقة أنه إذا اكتشفت موجات الجاذبية وأمكن دراستها في نهاية المطاف، فقد نكافأ بمفاجآت كبيرة.

في عام 1976، لم أكن قد أصبحت بعد متشائمًا بشأن أجهزة كشف القضبان. بالعكس، كنت متفائلًا جدًا. لقد وصل الجيل الأول من أجهزة الكشف عن القضبان إلى مرحلة التنفيذ مؤخرًا وعمل بحساسية ملحوظة مقارنة بما يمكن للمرء أن يتوقعه؛ ابتكر براجينسكي وآخرون عددًا من الأفكار الذكية والواعدة لإجراء تحسينات مستقبلية ضخمة. وكنت أنا وآخرون قد بدأنا للتو في إدراك أن موجات الجاذبية قد تُحدث ثورة في فهمنا للكون.

قادني حماسي وتفاؤلي، ذات مساء من شهر نوفمبر عام 1976، إلى التجول في شوارع باسادينا حتى وقت متأخر من الليل، وأنا أتصارع مع نفسي حول ما إذا كنت سأقترح على معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا إنشاء مشروع للكشف عن موجات الجاذبية. وكانت الحجج المؤيدة واضحة: بالنسبة إلى العلم بشكل عام، فإن المكاسب الفكرية هائلة إذا نجح المشروع؛ بالنسبة إلى معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، فرصة السبق في مجال جديد ومثير؛ بالنسبة إليّ، إمكانية وجود فريق من التجريبيين في مؤسستي المحلية للتفاعل معهم. بدلاً من الاعتماد بشكل أساسي على براجينسكي وفريقه على الجانب الآخر من العالم. وإمكانية لعب دور أكثر مركزية مما أستطيع التنقل إليه. إلى موسكو (وبالتالي الاستمتاع بمزيد من المرح). وكانت الحجة ضد ذلك واضحة أيضًا: فالمشروع سيكون محفوفًا بالمخاطر؛ ولتحقيق النجاح، سيتطلب الأمر موارد كبيرة من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا ومؤسسة العلوم الوطنية في واشنطن، ووقتًا وطاقات هائلين مني ومن الآخرين؛ وبعد كل هذا الاستثمار، قد تفشل. لقد كان الأمر أكثر خطورة بكثير من دخول معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا إلى علم الفلك الراديوي قبل ثلاثة وعشرين عامًا (الفصل التاسع).

وبعد ساعات طويلة من التأمل، أقنعتني إغراء المكافآت. وبعد عدة أشهر من دراسة المخاطر والمكاسب، وافقت هيئة التدريس والإدارة في الفيزياء والفلك في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا بالإجماع على اقتراحي، مع مراعاة شرطين. سيتعين علينا العثور على عالم فيزياء تجريبي متميز لقيادة المشروع، ويجب أن يكون المشروع كبيرًا وقويًا بما يكفي لتكون لدينا فرصة جيدة للنجاح. وهذا يعني، كما اعتقدنا، أكبر وأقوى بكثير من جهود فيبر في جامعة ماريلاند، أو جهود براجينسكي في موسكو، أو أي من الجهود الأخرى المتعلقة بموجات الجاذبية الجارية آنذاك.

كانت الخطوة الأولى هي العثور على قائد. سافرت إلى موسكو لأطلب نصيحة

براجينسكي وأشعره بالرغبة في تولي هذا المنصب. لقد مزقه إحساسي بكل طريقة. لقد كان ممزقاً بين التكنولوجيا الأفضل بكثير التي كان سيحصل عليها في أمريكا والحرفية الأكبر للفنيين في موسكو (على سبيل المثال، كان نفخ الزجاج المعقد فنًا مفقودًا تقريبًا في أمريكا، ولكن ليس في موسكو). لقد كان ممزقاً بين الحاجة إلى بناء مشروع من الصفر في أمريكا والعوائق المجنونة التي ظل النظام السوفييتي غير الفعال والمقيد بالبيروقراطية يضعها في طريق مشروعه في موسكو. كان ممزقاً بين الولاء لوطنه الأصلي والاشتمزاز من موطنه الأصلي، وبين مشاعره بأن الحياة في أمريكا همجية بسبب الطريقة التي تعامل بها فقراءنا وافتقارنا إلى الرعاية الطبية للجميع وبين مشاعره بأن الحياة في موسكو سيئة، وبأنه بسبب قوة المسؤولين غير الأكفاء. لقد كان ممزقاً بين الحرية والثروة في أمريكا والخوف من انتقام الكي جي بي من العائلة والأصدقاء، وربما حتى من نفسه إذا «انشق». في النهاية قال لا، وأوصى بدلاً من ذلك برونالد دريفر من جامعة جلاسكو.

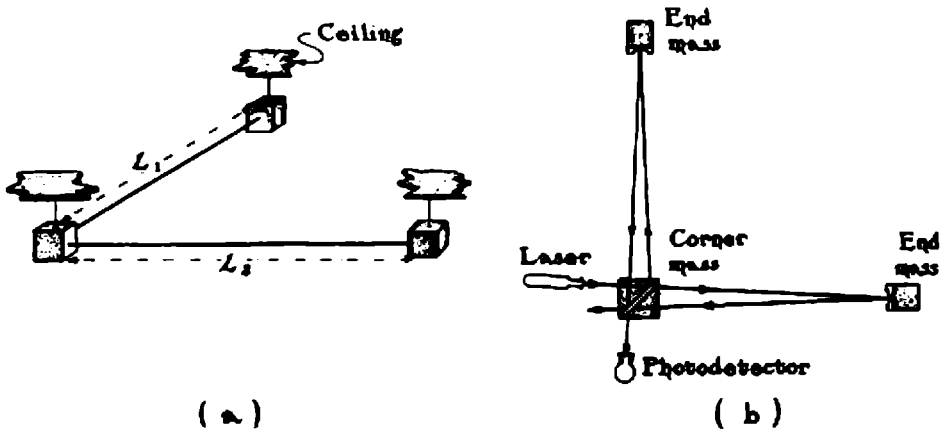
وكان الآخرون الذين استشرتهم متحمسين أيضًا لدريفر. مثل براجينسكي، كان مبدعًا ومبتكرًا ومثابراً للغاية، وهي سمات ضرورية لنجاح المشروع. جمّع أعضاء هيئة التدريس والإدارة في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا كل ما في وسعهم من معلومات عن دريفر وغيره من القادة المحتملين، واختاروا دريفر، ودعوه للانضمام إلى هيئة التدريس في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا وبدء المشروع. كان دريفر، مثل براجينسكي، ممزقاً، لكنه في النهاية قال نعم. كنا نسرع في المشروع.

لقد افترضت، عند اقتراح المشروع، أن معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، مثل فيبر وبراجينسكي، سيركز على بناء أجهزة الكشف عن القضبان. لحسن الحظ (في وقت لاحق) أصّر دريفر على اتجاه مختلف جذريًا. وفي جلاسكو، عمل مع أجهزة الكشف عن القضبان لمدة خمس سنوات، وكان بإمكانه رؤية حدودها. وكان يعتقد أن الأمر الواعد أكثر هو كواشف موجات الجاذبية التداخلية (مقاييس التداخل باختصار، على الرغم من أنها تختلف جذريًا عن مقاييس التداخل الراديوي المذكورة في الفصل التاسع).

صوّر مقاييس التداخل للكشف عن موجات الجاذبية لأول مرة في شكل بدائي في عام 1962 صديقان روسيان لبراجينسكي، ميخائيل جيرتسنشتاين وبوستوفيت، وبشكل مستقل في عام 1964 جوزيف فيبر. غير مدرك لهذه الأفكار المبكرة، ابتكر راينر فايس نموذجًا أكثر نضجًا لكاشف قياس التداخل في عام 1969، ثم واصل هو وفريقه في معهد

ماساتشوستس للتكنولوجيا تصميم وبناء واحد في أوائل السبعينيات، كما فعل روبرت فوروارد وزملاؤه في مختبرات هيوز للأبحاث في عام 1969. مالبو، كاليفورنيا. كان كاشف فوروارد أول ما عمل بنجاح. وبحلول أواخر سبعينيات القرن العشرين، أصبحت أجهزة الكشف عن التداخل هذه بديلاً جدياً للقضبان، وقد أضاف دريفر تطورات الذكاء إلى تصميمها.

يوضح الشكل 10.6 الفكرة الأساسية وراء كاشف موجات الجاذبية التداخلي. ثلاث كتل معلقة بأسلاك من دعامات علوية عند زاوية ونهايات حرف «L» (الشكل 10.6 a). حينما تدخل القمة الأولى لموجة الجاذبية المختبر من أعلى أو من أسفل، ينبغي لقوى المد والجزر أن تمد الكتلتين بعيداً عن بعضهما على طول إحدى ذراعي «L» في حين تضغطهما معاً على طول الذراع الأخرى. ستكون النتيجة زيادة في طول الذراع الأولى L_1 (أي في المسافة بين كتلي الذراع) وانخفاض في طول الذراع الثانية L_2 ، عندما تمر القمة الأولى للموجة وقاعها الأول عند وصولها، ستتغير اتجاهات التمدد والضغط: سوف ينخفض L_1 ويزيد L_2 . من خلال مراقبة الفرق في طول الذراع، $L_1 - L_2$ ، يمكن للمرء البحث عن موجات الجاذبية.



10.6 كاشف موجات الجاذبية بالليزر. تشبه هذه الأداة إلى حد كبير تلك التي استخدمها مايكلسون ومورلي عام 1887 للبحث عن حركة الأرض عبر الأثير (الفصل الأول). انظر النص للحصول على شرح مفصل.

يُراقب الفرق $L_1 - L_2$ باستخدام مقياس التداخل (الشكل 10.6 b والمربع 10.3). يضيء شعاع الليزر على مقسم الشعاع الموجود على كتلة الزاوية. يعكس مقسم الشعاع نصف الشعاع ويرسل نصفه، وبالتالي يقسم الشعاع إلى قسمين. ينزل الشعاعان إلى أسفل ذراعي مقياس التداخل ويرتدان عن المرايا التي تتركب على كتل طرفي الذراعين، ثم يعودان إلى مقسم الشعاع. يرسل المقسم نصف حزمة من الحزم ويعكس نصفها، بحيث يدمج جزءًا من ضوء كل شعاع مع جزء من الآخر ويعود نحو الليزر، وتُدمج الأجزاء الأخرى من الحزمتين وتتجه نحو الكاشف الضوئي. في حالة عدم وجود موجة جاذبية، تتداخل المساهمات من الذراعين بطريقة (الإطار 10.3) بحيث يعود كل الضوء الصافي نحو الليزر ولا شيء باتجاه الكاشف الضوئي. إذا تغيرت موجة الجاذبية قليلًا من L_1 إلى L_2 ، فإن الحزمتين ستنتقلان بعد ذلك لمسافات مختلفة قليلًا في ذراعيهما وسوف تتداخلان بشكل مختلف قليلًا -سندهب الآن كمية صغيرة من ضوءهما المدمج إلى الكاشف الضوئي. من خلال مراقبة كمية الضوء التي تصل إلى الكاشف الضوئي، يمكن للمرء مراقبة فرق طول الذراع $L_1 - L_2$ ، وبالتالي مراقبة موجات الجاذبية.

10.3 الإطار

التداخل وقياس التداخل

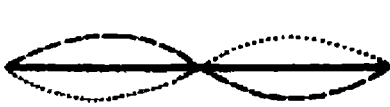
عندما تنتشر موجتان أو أكثر عبر نفس المنطقة من الفضاء، فإن بعضها يتراكب على بعض «خطيًا» (الإطار 10.1)؛ أي تُجمعان. على سبيل المثال، تترابك الموجة المنقطعة والموجة المتقطعة التالية لإنتاج الموجة النخينة:



لاحظ أنه في مواقع مثل A حيث يتراكب قاع موجة واحدة (منقط) على قمة الموجة الأخرى (متقطعة)، تُلغى الموجات، على الأقل جزئيًا، لإنتاج موجة إجمالية متلاشية أو ضعيفة (نخينة)؛ وفي مواقع مثل B حيث يتراكب قاعان أو تترابك قماتان، تعزز الموجات

بعضها بعضًا. يقول أحدهم إن الأمواج تتداخل مع بعضها، بشكل هدام في الحالة الأولى وبناءً في الثانية. يحدث مثل هذا التراكب والتداخل في جميع أنواع الموجات -أمواج المحيط، أمواج الراديو، أمواج الضوء، أمواج الجاذبية- ويعد هذا التداخل أمرًا أساسيًا لتشغيل أجهزة قياس التداخل الراديوي (الفصل التاسع) وكواشف قياس التداخل لموجات الجاذبية.

في كاشف قياس التداخل الموضح في الشكل 10.6 b، يركب مقسم الشعاع نصف موجة الضوء من إحدى الذراعين على نصف الذراع الأخرى ويرسلهما باتجاه الليزر، ويركب النصفين الآخرين ويرسلهما باتجاه الكاشف الضوئي. عندما لا تحرك أي موجة جاذبية أو أي قوة أخرى الكتل ومراياها، فإن موجات الضوء المترابكة تكون لها الأشكال التالية، حيث يوضح المنحنى المتقطع الموجة من الذراع 1، والمنحنى المتقطع هو الموجة من الذراع 2، والمنحنى الثخين هو الموجة المترابكة، الموجة الإجمالية:

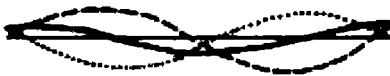


Toward Photodetector



Toward Laser

تجاه الكاشف الضوئي، تتداخل الموجات بشكل هدام تمامًا، وبالتالي تختفي الموجة الكلية المترابكة، مما يعني أن الكاشف الضوئي لا يرى أي ضوء على الإطلاق. عندما تؤدي موجة جاذبية أو قوة أخرى إلى إطالة الذراع قليلًا وتقصير الذراع الأخرى، فإن الشعاع من إحدى الذراعين يصل إلى مقسم الحزمة بتأخير طفيف بالنسبة إلى الذراع الأخرى، وبالتالي تبدو الموجات المترابكة كما يلي:



Toward Photodetector



Toward Laser

لم يعد التداخل الهدام في اتجاه الكاشف الضوئي مثاليًا؛ يتلقى الكاشف الضوئي بعض الضوء. وتناسب الكمية التي يستقبلها مع فرق طول الذراع $L_1 - L_2$ والذي بدوره يتناسب مع إشارة موجة الجاذبية.

ومن المثير للاهتمام مقارنة كاشف القضيب بمقياس التداخل. يستخدم كاشف القضيب اهتزازات أسطوانة صلبة واحدة لمراقبة قوى المد والجزر لموجة الجاذبية. يستخدم كاشف التداخل الحركات النسبية للكتل المعلقة من الأسلاك لمراقبة قوى المد والجزر.

يستخدم كاشف القضيب مستشعراً كهربائياً (على سبيل المثال، بلورات إنتاج الكهرباء بفعل الضغط مضغوطة بواسطة القضيب) لمراقبة الاهتزازات الناتجة عن موجة القضيب. يستخدم كاشف قياس التداخل أشعة ضوئية متداخلة لمراقبة حركات الموجات الناتجة عن كتلته.

يستجيب القضيب بشكل تأثري فقط لموجات الجاذبية عبر نطاق ترددي ضيق، وبالتالي، فإن فك تشفير سيمفونية الموجات سيتطلب إكسيليفوناً مكوناً من العديد من القضبان. تهتز كتل مقياس التداخل ذهاباً وإياباً استجابةً لموجات من جميع الترددات أعلى من نحو دورة واحدة في الثانية⁷، ولهذا السبب يتمتع مقياس التداخل بعرض نطاق واسع؛ ثلاثة أو أربعة مقاييس تداخل كافية لفك تشفير السيمفونية بالكامل.

ومن خلال جعل أذرع مقياس التداخل أطول بألف مرة من القضيب (بضعة كيلومترات بدلاً من بضعة أمتار)، يمكن للمرء أن يجعل قوى المد والجزر للأمواج أكبر ألف مرة وبالتالي تحسين حساسية الجهاز ألف مرة⁸. وعلى النقيض من ذلك، لا يمكن تطويل القضيب كثيراً. سيكون لقضيب طوله كيلومتر تردد طبيعي أقل من دورة واحدة في الثانية، وبالتالي لن يعمل على الترددات التي نعتقد أن المصادر الأكثر إثارة للاهتمام تكمن فيها. بالإضافة إلى ذلك، عند مثل هذا التردد المنخفض، لا بد من إطلاق القضيب في الفضاء لعزله عن اهتزازات الأرض وعن الجاذبية المتقلبة للغلاف الجوي للأرض. إن وضع مثل هذا الشريط في الفضاء سيكون مكلفاً للغاية.

ولأنه أطول بألف مرة من القضيب، فإن مقياس التداخل يكون أكثر مناعة بألف مرة ضد «الركلة» الناتجة عن عملية القياس. وتعني هذه الحصانة أن مقياس التداخل لا يحتاج إلى التحايل على الركلة بمساعدة مستشعر لا هدمي كمومي (يصعب بناؤه). وعلى النقيض من ذلك، لا يستطيع القضيب اكتشاف الموجات المتوقعة إلا إذا استخدم تقنية اللا هدم الكمومي.

إذا كان مقياس التداخل يتمتع بمثل هذه المزايا الرائعة مقارنة بالقضيب (عرض نطاق ترددي أكبر بكثير وحساسية محتملة أكبر بكثير)، فلماذا لم يبنِ براجينسكي وفير وآخرون مقياس التداخل بدلاً من القضبان؟ عندما سألت براجينسكي في منتصف سبعينيات القرن الماضي، أجاب بأن أجهزة الكشف عن القضبان بسيطة، في حين أن مقياس التداخل معقدة بشكل رهيب. كان لدى فريق صغير ومقرب مثل فريقه في موسكو فرصة معقولة لجعل أجهزة الكشف باستخدام القضيب تعمل بشكل جيد بما يكفي لاكتشاف موجات الجاذبية. ومع ذلك، فإن نجاح بناء كواشف قياس التداخل وتصحيح أخطائها وتشغيلها بشكل كامل يتطلب فريقاً ضخماً ومبالغ كبيرة من المال، وشكك براجينسكي في إمكانية نجاح كاشف معقد كهذا، حتى مع وجود مثل هذا الفريق ومثل هذه الأموال.

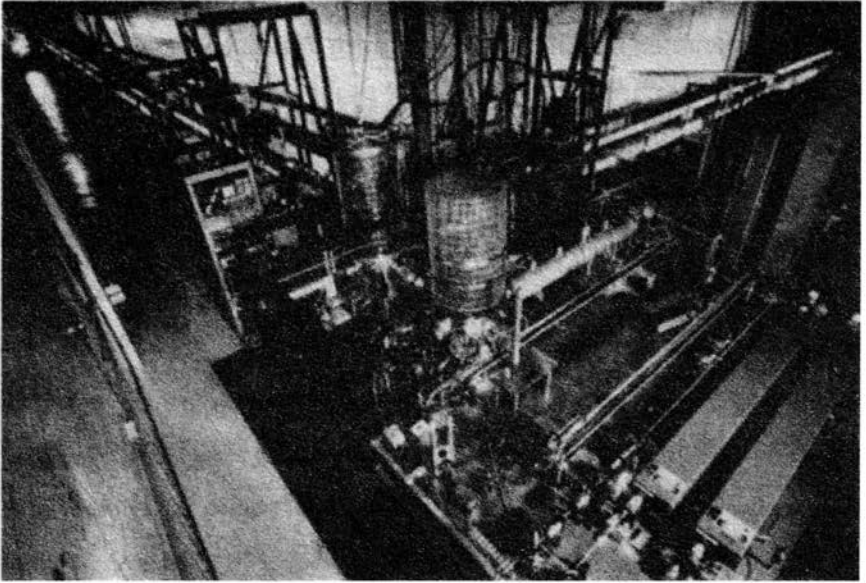
وبعد مرور عشر سنوات، ومع تزايد الأدلة المؤلمة على أن القضبان ستواجه صعوبة كبيرة في الوصول إلى حساسية 10^{-21} ، زار براجينسكي معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا وأبدى إعجابه بالتقدم الذي حققه فريق دريفر في مجال مقياس التداخل. وخلص إلى أن مقياس التداخل ستنتجج على الأرجح في نهاية المطاف. لكن الفريق الضخم والأموال الكبيرة المطلوبة لتحقيق النجاح لم يكونا على ذوقه؛ لذلك، عند عودته إلى موسكو، أعاد توجيه معظم جهود فريقه بعيداً عن اكتشاف موجات الجاذبية. (في أماكن أخرى من العالم، استمر تطوير كواشف القضبان، وهذا لحسن الحظ؛ فهي رخيصة الثمن مقارنة بمقياس التداخل، وهي الآن أكثر حساسية من ذي قبل، وقد تلعب على المدى الطويل أدواراً خاصة عند ترددات موجات الجاذبية العالية).

أين يكمن تعقيد أجهزة الكشف عن التداخل؟ وفي النهاية، فإن الفكرة الأساسية، كما هو موضح في الشكل 10.6، تبدو بسيطة إلى حد معقول.

في الواقع، يعد الشكل 10.6 تبسيطاً مغللاً لأنه يتجاهل عددًا هائلاً من المآزق. إن الحيل المطلوبة لتجنب هذه المآزق تجعل من مقياس التداخل أداة معقدة للغاية. على سبيل المثال، يجب أن يشير شعاع الليزر بدقة إلى الاتجاه الصحيح وأن يكون له الشكل الصحيح والطول الموجي المناسب ليتناسب تمامًا مع مقياس التداخل؛ ويجب ألا يتقلب طول موجته وكثافته. بعد انقسام الشعاع إلى نصفين، يجب أن يرتد العارضان ذهاباً وإياباً في الذراعين ليس مرة واحدة فقط كما في الشكل 10.6، ولكن عدة مرات، وذلك لزيادة حساسيتهما لحركات الكتل المتذبذبة، وبعد هذه الارتدادات العديدة، يجب أن يلتقي بعضهما ببعض بشكل مثالي عند مقسم الشعاع. يجب التحكم في كل كتلة باستمرار

بحيث تشير مراهاها بدقة إلى الاتجاهات الصحيحة ولا تتأرجح نتيجة لاهتزازات الأرضية، ويجب أن يحدث ذلك من دون إخفاء اهتزازات الكتلة الناجمة عن موجات الجاذبية. لتحقيق الكمال في كل هذه الطرق، وفي العديد من الطرق الأخرى، يتطلب الأمر مراقبة مستمرة للعديد من القطع المختلفة لمقاييس التداخل وأشعة الضوء الخاصة به، وتطبيق القوى الارتدادية بشكل مستمر للحفاظ على الكمال.

يحصل المرء على بعض الانطباع عن هذه التعقيدات من صورة فوتوجرافية (الشكل 10.7) لنموذج أولي لكاشف تداخل يبلغ قطره 40 مترًا، والذي بناه فريق دريفر في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا - وهو نموذج أولي أبسط بكثير في حد ذاته من كاشف كامل النطاق يبلغ طوله عدة كيلومترات وهي مقاييس التداخل المطلوبة للنجاح.



10.7 النموذج الأولي لكاشف موجات الجاذبية بقياس تداخلي 40 مترًا من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، كاليفورنيا. 1989. تحتوي الطاولة الموجودة في المقدمة والحجرة المفرغة الأمامية على أجهزة ليزر وأجهزة لإعداد ضوء الليزر للدخول إلى مقاييس التداخل. وتوجد الكتلة المركزية في الغرفة المفرغة الثانية المحصورة، وهي الغرفة التي يمكن رؤية جبل متدلّ فوقها بشكل خافت. تقع الكتل النهائية على بُعد 40 مترًا، أسفل الممرين. تسلط أشعة الليزر الخاصة بالذراعين الضوء على الأنابيب الأكبر من الأنبوبين المفرغين الذي يمتد على طول الممرات. [إهداء من مشروع LIGO، معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا].

خلال أوائل الثمانينيات، كافحت أربع فرق من علماء الفيزياء التجريبية لتطوير أدوات وتقنيات للكشف عن التداخل: فريق دريفر في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، والفريق الذي أسسه في جلاسكو (يقوده الآن جيمس هوج)، وفريق راينر فايس في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، وفريق أسسه هانز بيلينج في معهد ماكس بلانك في ميونيخ، ألمانيا. كانت الفرق صغيرة الحجم وحميمة، وعملت بشكل مستقل إلى حد ما، متبعةً مناهجها الخاصة في تصميم أجهزة الكشف عن التداخل. داخل كل فريق، كان للعلماء الحرية في اختراع أفكار جديدة ومتابعتها كما يحلو لهم وللمدة التي يرغبون فيها؛ كان التنسيق فضفاضًا جدًا. هذا هو بالضبط نوع الثقافة التي يحبها العلماء المبدعون ويزدهرون بها، الثقافة التي يتوق إليها براجينسكي، الثقافة التي يكون فيها المنعزلون مثلي أكثر سعادة. ولكنها ليست ثقافة قادرة على تصميم وبناء وتصحيح الأخطاء، وتشغيل أدوات علمية ضخمة ومعقدة مثل أجهزة قياس التداخل التي يبلغ طولها عدة كيلومترات، والمطلوبة لتحقيق النجاح.

إن التصميم التفصيلي للأجزاء المعقدة العديدة من مقاييس التداخل هذه، وجعلها جميعًا متوافقة معًا وتعمل معًا بشكل صحيح، وإبقاء التكاليف تحت السيطرة، وإنجاز مقاييس التداخل خلال فترة زمنية معقولة، يتطلب ثقافة مختلفة: ثقافة التنسيق المحكم، مع مجموعات فرعية من كل فريق تركز على مهام محددة جيدًا، ومدير واحد يتخذ القرارات بشأن المهام التي ستنفذ ومتى ومن سيقوم بها.

إن الطريق من الاستقلال الحر إلى التنسيق المحكم هو طريق مؤلم. يسير مجتمع البيولوجيين في العالم على هذا الطريق، مع صرخات الألم، في حين يتحرك نحو تحديد تسلسل الجينوم البشري. ونحن، علماء فيزياء موجات الجاذبية، نسير على هذا الطريق منذ عام 1984، من دون أن نشعر بالألم وكرب أقل. لكنني على يقين من أن الإثارة والمتعة والمكافأة العلمية في اكتشاف الأمواج وفك رموز سيمفونياتها ستجعل الألم والكرب يتلاشيان من ذاكرتنا يومًا ما.

كان أول منعطف حاد في طريقنا المؤلم هو الزواج الذي حدث في عام 1984 بين فرريقي معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا ومعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، وكان كل منهما يضم في ذلك الوقت نحو ثمانية أعضاء. أمسك ريتشارد إيزاكسون من مؤسسة العلوم الوطنية (NSF) بالبندقية وطالب، كضمن للدعم المالي من دافعي الضرائب، بزواج محكم يشترك فيه علماء معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا ومعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا في

تطوير مقاييس التداخل. قال دريفر (يقاوم بجنون) وفايس (يقبلان ما لا مفر منه عن طيب خاطر) عهدهما، وأصبحت أنا مستشار الزواج، الرجل المكلف بمهمة صياغة الإجماع عندما انسحب دريفر في اتجاه وفايس في اتجاه آخر. لقد كان زواجًا صعبًا، مستنزفًا عاطفيًا للجميع، ولكننا بدأنا العمل معًا تدريجيًا.

وجاء التحول الحاد الثاني في نوفمبر عام 1986. فقد أمضت لجنة من علماء الفيزياء البارزين -خبراء في كل التقنيات التي نحتاج إليها وخبراء في تنظيم وإدارة المشاريع العلمية الكبيرة- أسبوعًا كاملاً معنا، لتدقيق التقدم الذي أحرزناه وخططنا له، ثم رفعت تقريرًا عن هذا الأمر إلى NFS. حصل تقدمنا على علامات عالية، وحصلت خططنا على علامات عالية، وصُنفت توقعات نجاحنا -في اكتشاف الموجات وفك رموز سيمفونياتها- على أنها عالية. لكن ثقافتنا صُنفت على أنها فظيعة؛ لقد كنا لا نزال منغمسين في ثقافة ولادتنا المتماسكة والطيقة، ولن نتمكن أبدًا من النجاح بهذه الطريقة، كما قيل لـ NSF. أصرت اللجنة على أن تستبدل بثلاثية دريفر فايس ثورن مخرجًا واحدًا، وهو مدير يمكنه تشكيل الأفراد الموهوبين في فريق متماسك وفعال ويمكنه تنظيم المشروع واتخاذ قرارات حازمة وحكيمة في كل منعطف رئيسي.

خرجت البندقية مرة أخرى. إذا كنت تريد أن يستمر مشروعك، كما أخبرنا إيزاكسون من NSF، يجب عليك العثور على هذا المخرج وتعلم العمل معه مثلما يعمل فريق كرة قدم مع مدرب عظيم أو أوركسترا مع قائد عظيم.

كنا محظوظين. في خضم بحثنا، طُرد روبي فوجت.

كان فوجت، عالم فيزياء تجريبي لامع وقوي الإرادة، قد أدار مشاريع لبناء وتشغيل الأدوات العلمية على المركبات الفضائية، كما أدار بناء مقياس تداخل فلكي ضخم بطول موجة ملليمترية، وأعاد تنظيم بيئة البحث العلمي لمختبر الدفع النفاث التابع لناسا (والذي ينفذ معظم برنامج استكشاف الكواكب الأمريكي) -وبعد ذلك أصبح عميد معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا. بصفته عميدًا، على الرغم من فعاليته الملحوظة، خاض فوجت معركة شرسة مع رئيس معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، مارفن جولدبرجر، حول كيفية إدارة معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا -وبعد عدة سنوات من المعركة، طرده جولدبرجر. لم يكن فوجت مناسبًا مزاجيًا للعمل تحت إشراف الآخرين عندما يختلف بشدة مع أحكامهم،

ولكن في القيادة، كان رائعًا. لقد كان فقط المدير، القائد، المدرب الذي نحتاج إليه. إذا كان بإمكان أي شخص أن يجعلنا فريقًا متماسكًا، فبالأكيد هو.



جزء من فريق معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا/ معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا لعلماء مرصد LIGO في أواخر عام 1991. اليسار: بعض أعضاء فريق معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، عكس اتجاه عقارب الساعة من أعلى اليسار: آرون جيليسي، فريد راب، ماجي تايلور، سيجي كاوامورا، روبي فوجت، رونالد دريفر، ليزا سيفرز، أليكس أبراموفيتشي، بوب سبيرو، مايك زوكر. على اليمين: بعض أعضاء فريق معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. عكس اتجاه عقارب الساعة من أعلى اليسار: جو كوفاليك، يارون حيفتس، نرجس مافالفا، راينر فايس، ديفيد شوماخر، جو جيايمي. [يسار: إهداء كين روجرز/ بلاك ستار؛ على اليمين: إهداء إريك إل. سيمونز].

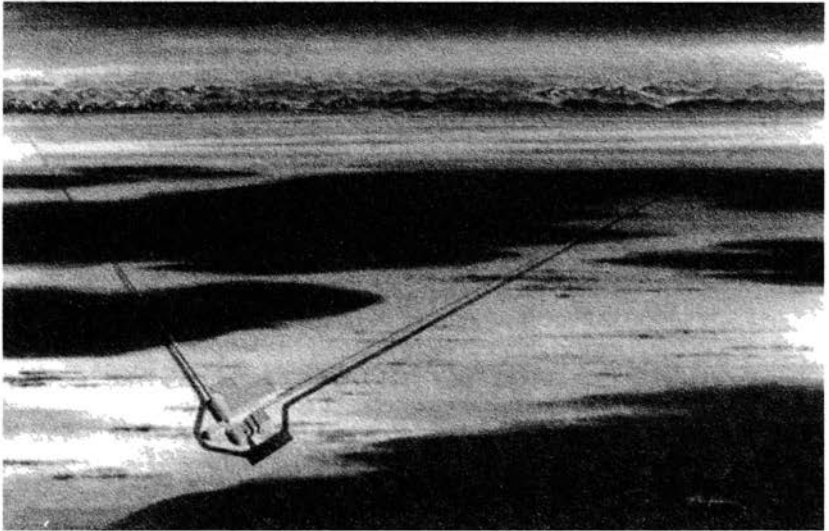
أخبرنا أحد الأعضاء السابقين في فريقه المليميتر: «سيكون العمل مع روبي مؤلمًا». «سوف تخرج مصابًا بكدمات وندوب، لكن الأمر يستحق ذلك. مشروعك سينجح».

لعدة أشهر، ناشدت أنا ودريفر وفايس وآخرون فوجت لتولي منصب المدير. وافق أخيرًا. وكما أخبرونا، بعد ست سنوات، تعرض فريق معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا/ معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا للكدمات والندوب، ولكنه فعال وقوي ومتماسك وينمو بسرعة نحو الحجم الحرج (نحو خمسين عالمًا ومهندسًا) المطلوب لتحقيق النجاح. لكن النجاح لن يعتمد علينا وحدنا. وبموجب خطة فوجت، فإن المدخلات

المهمة لجهودنا الأساسية ستأتي من علماء آخرين¹⁰، الذين، من خلال ارتباطهم بنا بشكل فضفاض، يمكنهم الحفاظ على الأسلوب الفردي الحر الذي تخلينا عنه.

إن مفتاح النجاح في مسعانا سيكون بناء وتشغيل منشأة علمية وطنية تسمى مرصد موجات الجاذبية بالليزر أو LIGO. سيتألف مرصد LIGO من نظامين فراغيين على شكل حرف L، أحدهما بالقرب من هانفورد بواشنطن، والآخر بالقرب من ليفينجستون بولاية لويزيانا، حيث سيعمل الفيزيائيون فيهما على تطوير وتشغيل العديد من الأجيال المتعاقبة من مقاييس التداخل التي تتحسن باستمرار؛ انظر الشكل 10.8.

لماذا منشأتان بدلاً من واحدة؟ لأن أجهزة كشف موجات الجاذبية المرتبطة بالأرض تحتوي دائماً على شوشرة غير مفهومة تحاكي انفجارات موجات الجاذبية؛ على سبيل المثال، يمكن للسلك الذي يعلق كتلة أن يصدر صريراً طفيفاً من دون سبب واضح، وبالتالي يهز الكتلة ويحاكي قوة المد والجزر للموجة. ومع ذلك، فإن مثل هذه الشوشرة لا تحدث أبداً في وقت واحد في كاشفين مستقلين، ومتباعدين. وبالتالي، للتأكد من أن الإشارة الظاهرة ناتجة عن موجات الجاذبية وليس عن الشوشرة، يجب على المرء التحقق من حدوثها في اثنين من هذه الكواشف. باستخدام كاشف واحد فقط، لا يمكن اكتشاف موجات الجاذبية ومراقبتها.



10.8 تصور في لنظام التفريغ على شكل حرف L الخاص بمرصد LIGO والمرافق التجريبية الواقعة عند زاوية L، بالقرب من هانفورد، واشنطن. [إهداء من مشروع LIGO، معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا].

على الرغم من أن وجود منشأتين كافٍ للكشف عن موجة الجاذبية، فإنه يلزم وجود ثلاثة مرافق على الأقل، ويُفضَّل أربعة، في مواقع منفصلة على نطاق واسع، لفك تشفير سيمفونية الموجة بشكل كامل؛ أي لاستخراج جميع المعلومات التي تحملها الموجة. سيبني فريق فرنسي/ إيطالي مشترك المنشأة الثالثة، المسماة VIRGO¹¹ بالقرب من بيزا، إيطاليا. سيشكل كل من VIRGO و LIGO معًا شبكة دولية لاستخراج المعلومات الكاملة. تسعى فرق في بريطانيا وألمانيا واليابان وأستراليا للحصول على أموال لبناء مرافق إضافية للشبكة.

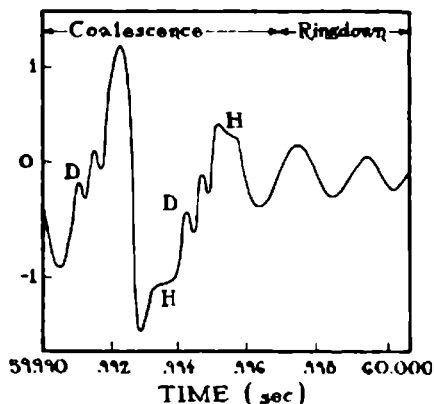
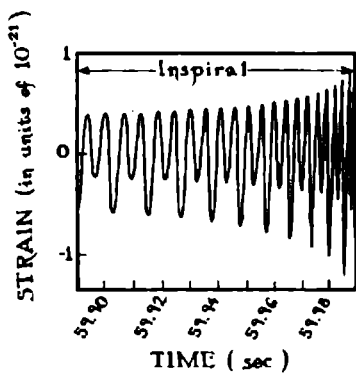
قد يبدو من الجرأة بناء مثل هذه الشبكة الطموحة لنوع من الموجات لم يسبق لأحد رؤيته من قبل. في الواقع، إنها ليست جرأة على الإطلاق. لقد أُثبت بالفعل وجود موجات الجاذبية من خلال البيانات الرصدية الفلكية التي فاز بها جوزيف تايلور وراسل هولس من جامعة برينستون بجائزة نوبل عام 1993. عثر تايلور وهولس، باستخدام التلسكوب الراديوي، على نجمين نيوترونيين، أحدهما نجم نابض، يدور بعضهما حول بعض مرة كل 8 ساعات؛ ومن خلال قياسات راديوية دقيقة بشكل رائع، تأكدوا من أن النجوم تتجمع معًا بالمعدل الدقيق (2.7 جزء من المليار سنويًا) الذي تنبأت به قوانين أينشتاين، وذلك بسبب تعرضها المستمر لموجات الجاذبية التي تنبعث منها عبر الكون. لا شيء آخر، سوى ركلات صغيرة من موجات الجاذبية، يمكن أن تفسر شكل النجوم.

كيف سيكون علم فلك موجات الجاذبية في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين؟ السيناريو التالي محتمل:

بحلول عام 2007، تصبح ثمانية أجهزة قياس تداخل، يبلغ طول كل منها عدة كيلومترات، تعمل بدوام كامل طول الوقت، وتمسح السماء بحثًا عن دقات واردة من موجات الجاذبية. ويعمل اثنان منها في منشأة التفريغ في بيزا، إيطاليا، واثنان في ليفينجستون، لويزيانا، في جنوب شرق الولايات المتحدة، واثنان في هانفورد، واشنطن، في شمال غرب الولايات المتحدة، واثنان في اليابان. من بين مقياسي التداخل في كل موقع، أحدهما عبارة عن أداة «عمود فقري» تراقب تذبذبات الموجة بين نحو 10 دورات في الثانية و 1000 دورة؛ أما الآخر، الذي طُوِّر وُركب مؤخرًا، فهو مقياس تداخل «متخصص» متقدم يركز على التذبذبات بين 1000 و 3000 دورة في الثانية.

يجتاح قطار من موجات الجاذبية النظام الشمسي من مصدر كوني بعيد. تضرب كل قمة موجة أجهزة الكشف اليابانية أولاً، ثم تكتسح الأرض حتى تصل إلى أجهزة كشف واشنطن، ثم لوزيانا، وأخيراً إيطاليا. ولمدة دقيقة تقريباً، يتبع القمة قاع وتبعه قمة. تهتز الكتل الموجودة في كل كاشف بشكل طفيف جداً، مما يؤدي إلى اضطراب أشعة الليزر وبالتالي اضطراب الضوء الذي يدخل الثنائي الضوئي للكاشف. ترسل مخرجات الثنائي الضوئي الثمانية عن طريق وصلات الأقمار الصناعية إلى جهاز حاسوب مركزي، والذي ينبه فريقاً من العلماء إلى وصول موجة جاذبية أخرى مدتها دقيقة واحدة إلى الأرض، وهي الثالثة هذا الأسبوع. يجمع الحاسوب مخرجات أجهزة الكشف الثمانية لإنتاج أربعة أشياء: أفضل موقع تخميني لمصدر الانفجار في السماء؛ ومربع خطأ لموقع أفضل تخمين؛ واثنان من الأشكال الموجية -منحنيان متذبذبان، مشابهان للمنحنى المتذبذب الذي تحصل عليه إذا فحصت أصوات سيمفونية على راسم الذبذبات الذي يفك تشفير تاريخ المصدر في هذه الأشكال الموجية (الشكل 10.9).

هناك شكلان موجيان لأن موجة الجاذبية لها استقطابان. إذا انتقلت الموجة عمودياً عبر مقياس تداخل، فإن أحد الاستقطابات يصف قوى المد والجزر التي تتأرجح على طول اتجاهات الشرق والغرب والشمال والجنوب؛ ويصف الآخر قوى المد والجزر التي تتأرجح على طول الاتجاهات الشمالية الشرقية والجنوبية الغربية والشمالية الغربية والجنوبية الشرقية. يشعر كل كاشف، باتجاهه الخاص، بمزيج من هذين الاستقطابين؛ ومن مخرجات الكاشف الثمانية، يعيد الحاسوب بناء الشكلين الموجيين. ثم يقارن الحاسوب أشكال الموجات مع تلك الموجودة في كتالوج كبير، مثلما يتعرف مراقب الطيور على الطائر من خلال مقارنته بالصور الموجودة في كتاب. لقد أنتج الكتالوج من خلال محاكاة المصادر على أجهزة الحاسوب، ومن خلال خمس سنوات من الخبرة السابقة في مراقبة موجات الجاذبية الناتجة عن تصادم الثقوب السوداء واندماجها، والنجوم النيوترونية المتصادمة والمتحدة، والنجوم النيوترونية الدوارة (النجوم النابضة)، وانفجارات المستعرات العظمى. فيصبح التعرف على هذه الانفجارات أمراً سهلاً (بعضها الآخر، على سبيل المثال، من المستعرات العظمى، أصعب بكثير). تُظهر الأشكال الموجية التوقيع الفريد الذي لا جدال فيه لاثنتين من الثقوب السوداء المتحدين.



10.9 أحد الشكلين الموجيين الناتجين عن اندماج ثقبين أسودين. ترسم الموجة لأعلى بوحدات 10^{-21} مرة قيمة رسمها أفقيًا بوحدات الثواني. يُظهر الرسم البياني الأول آخر 0.1 ثانية فقط من الجزء على هيئة دوامة من شكل الموجة؛ الدقيقة السابقة لشكل الموجة مشابهة لزيادة السعة والتردد تدريجيًا. ويبين الرسم البياني الثاني آخر 0.01 ثانية، على مقياس ممتد. لقد فُهِمَت الأجزاء على هيئة دوامة وعلى هيئة حلقة للشكل الموجي جيدًا، في عام 1993، من خلال حلول معادلة أينشتاين للمجال. لم يُفهم مقطع الاندماج على الإطلاق (المنحنى الموضح هو تخالي الخاص)؛ ستحاول عمليات محاكاة الحاسوب العملاق المستقبلية حسابها. يُفترض في النص أن عمليات المحاكاة هذه ستصبح ناجحة في أوائل القرن الحادي والعشرين.

تتكون الأشكال الموجية من ثلاثة أقسام:

- الجزء الأول الذي يبلغ طوله دقيقة واحدة (والذي يظهر آخر 0.1 ثانية فقط منه في الشكل 10.9) يحتوي على سلاسل متذبذبة تنمو تدريجيًا في السعة والتردد؛ هذه هي بالضبط الأشكال الموجية المتوقعة من الشكل على هيئة دوامة لجسمين في مدار ثنائي. تشير حقيقة أن الموجات البديلة أصغر وأكبر إلى أن المدار بيضاوي الشكل إلى حد ما وليس دائريًا.

- يطابق الجزء الأوسط الذي يبلغ طوله ثانية 0.01 بشكل شبه كامل الأشكال الموجية التي تنبأت بها عمليات المحاكاة الحاسوبية العملاقة الحديثة (أوائل القرن الحادي والعشرين) لاندماج ثقبين أسودين لتكوين ثقب واحد؛ وبحسب عمليات المحاكاة، فإن الحدبات التي تحمل علامة «H» تشير إلى تلامس ودمج آفاق الثقوب.

ومع ذلك، فإن الاهتزازات المزدوجة التي تحمل علامة «D» هي اكتشاف جديد، وهو الأول الذي سنتوصل إليه بواسطة مقاييس التداخل المتخصصة الجديدة. لم تتمكن مقاييس التداخل الأقدم من اكتشاف هذه الاهتزازات بسبب ترددها العالي، ولم تمكن رؤيتها من قبل في أي محاكاة للحاسوب العملاق. إنها تحد جديد يجب على المنظرين شرحه. قد تكون هذه هي التلميحات الأولى لبعض الغرابة التي لم تكن متوقعة سابقاً في الاهتزازات غير الخطية لمنحنى الزمكان للثقوب المتصادمة. وسيعود المنظرون، المفتونون بهذا الاحتمال، إلى عمليات المحاكاة التي أجروها، وسيبحثون عن دلائل على مثل هذه الاهتزازات المزدوجة.

• يتكون الجزء الثالث الذي يبلغ طوله 0.03 ثانية (والذي تظهر بدايته فقط في الشكل 10.9) من تذبذبات ذات تردد ثابت وسعة تموت تدريجياً. هذا هو بالضبط الشكل الموجي المتوقع عندما ينبض ثقب أسود مشوه للتخلص من تشوهات؛ أي أنه يرن مثل الجرس المقروع. تتكون النبضات من تنوعين من نوع الدمبل يدوران حول خط استواء الثقب، ويختفيان تدريجياً عندما تسحب موجات الانحناء طاقتها (الشكل 10.2 أعلاه).

من تفاصيل الأشكال الموجية، لا يستخرج الحاسوب فقط تاريخ شكل الدوامة، والالتحام، والرنين؛ بل إنه يستخرج أيضاً الكتل ومعدلات الدوران للثقوب الأولية والثقب النهائي. كان وزن كل من الثقوب الأولية 25 مرة ضعف وزن الشمس، وكانت تدور ببطء. ويبلغ وزن الثقب الأخير 46 ضعف وزن الشمس، ويدور بمعدل 78٪ من الحد الأقصى المسموح به. تتحول طاقة تساوي أربع كتل شمسية ($4 = 46 - 25 \times 2$) إلى موجات من الانحناء وتحملها الأمواج بعيداً. وكانت المساحة الإجمالية للثقوب الأولية 136000 كيلومتر مربع. تكون المساحة السطحية الإجمالية للثقب الأخير أكبر، كما يتطلب القانون الثاني لميكانيكا الثقب الأسود (الفصل الثاني عشر): 144000 كيلومتر مربع. وتكشف الأشكال الموجية أيضاً عن مسافة الثقب من الأرض: مليار سنة ضوئية، وهي نتيجة دقيقة تصل إلى نحو 20 بالمائة. تخبرنا أشكال الموجات أننا على الأرض كنا ننظر إلى الأسفل بشكل عمودي تقريباً على مستوى المدار، وننظر الآن إلى أسفل القطب الشمالي للثقب الدوار؛ وتظهر لنا أن مدار الثقوب كان له انحراف مركزي (استطالة) بنسبة 30 بالمائة.

ويحدد الحاسوب موقع الثقوب في السماء من أوقات وصول قمم الموجات إلى اليابان وواشنطن ولوزيانا وإيطاليا. ومنذ أن تضرب اليابان أولاً، تكون الثقوب أعلى أو أسفل في اليابان، وفي الأسفل في أمريكا وأوروبا. يوفر التحليل التفصيلي لزمن الوصول أفضل موقع تخميني للمصدر، ومربع خطأ حول هذا الموقع بحجم درجة واحدة. لو كانت الثقوب أصغر، لتذبذبت أشكالها الموجية بسرعة أكبر وكان مربع الخطأ أكثر إحكامًا، ولكن بالنسبة إلى هذه الثقوب الكبيرة، فإن درجة واحدة هي أفضل ما يمكن أن تفعله شبكة المراصد. وفي غضون عشر سنوات أخرى، عندما يعمل كاشف قياس التداخل على القمر، سينخفض حجم مربعات الخطأ على جانب واحد بمعامل قدره 100.

ونظرًا لأن مدار الثقبين كان ممدودًا، فقد استنتج الحاسوب أن الثقبين قد التقطا في مدار بعضهما حول بعض قبل ساعات قليلة فقط من اندماجهما وإصدار الانفجار. (إذا كان أحدهما يدور حول الآخر لمدة تزيد على بضع ساعات، فإن دفع موجات الجاذبية المتباعدة عن الثنائي سيجعل مدارهما دائريًا). ويعني الالتقاط الأخير أن الثقوب كانت على الأرجح في مجموعة كثيفة من الثقوب السوداء والنجوم الضخمة في مكان قريب، مركز مجرة ما.

ولذلك يفحص الحاسوب كتالوجات المجرات الضوئية، والمجرات الراديوية، ومجرات الأشعة السينية، بحثًا عن أي منها موجود في مربع خطأ قدره درجة، ويقع على بُعد ما بين 0.8 و1.2 مليار سنة ضوئية من الأرض، وله قلوب ذات شكل غريب. لقد عُثر على أربعين مرشحًا وقد أُبلغت إلى علماء الفلك. على مدى السنوات القليلة المقبلة، سيُدرس هؤلاء المرشحون الأربعون بالتفصيل، باستخدام التلسكوبات الراديوية والمليمترية والأشعة تحت الحمراء والبصرية والأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية وأشعة جاما. تدريجيًا، سوف يصبح من الواضح أن إحدى المجرات المرشحة لها قلب بدأ فيه تكتل ضخيم من الغاز والنجوم، عندما غادر الضوء الذي نراه الآن المجرة، وهي مرحلة من التطور العنيف دامت مليون عام -وهو التطور الذي سوف يؤدي إلى ولادة ثقب أسود عملاق، ومن ثم نجم زائف. وبفضل انفجار موجات الجاذبية التي حددت هذه المجرة المحددة على أنها مثيرة للاهتمام، يمكن لعلماء الفلك الآن البدء في كشف تفاصيل كيفية ولادة الثقوب السوداء العملاقة.

1. يأتي العامل $1/30$ من الحسابات التفصيلية لمعادلة أينشتاين للمجال. ويتضمن العامل $1/(2\pi)$ وهو ما يقرب $6/1$ من تحويل محيط الثقب إلى نصف قطر، وعامل إضافي $5/1$ ينشأ من تفاصيل معادلة المجال لأينشتاين.
2. أنتجت أجهزة الليزر الخاصة بهم في الواقع موجات ميكروويف (موجات الراديو ذات الطول الموجي القصير) بدلاً من الضوء، وبالتالي سميت ميزر بدلاً من «الليزر». لم تصنع أجهزة الليزر «الحقيقية»، النوع الذي ينتج الضوء، بنجاح، إلا بعد مرور عدة سنوات.
3. يتمتع براجينسكي بإتقان رائع للفروق الدقيقة في اللغة الإنجليزية؛ فهو يستطيع أن يبني عبارة إنجليزية بليغة لوصف فكرة جديدة بسهولة أكبر بكثير من معظم الأمريكيين أو البريطانيين.
4. الأساس الرئيسي لفكرتنا جاء من زميلنا، ويليام أونروه، في جامعة كولومبيا البريطانية. نُفذ تطوير الفكرة وعواقبها بشكل مشترك بيني وبين كيفز وثلاثة آخرين كانوا مجتمعين حول مائدة الغداء معنا عندما اكتشفنا الفكرة: رونالد دريفر، وفيرنون ساندبرج، ومارك زيمرمان.
5. وُصفت الفكرة الكاملة بواسطة كافيس ومشاركيه. (1980) وبواسطة براجينسكي وفورونستوف وثورن (1980).
6. هذه الاختلافات وعواقبها وتفاصيل الموجات المتوقعة من مختلف المصادر الفيزيائية الفلكية وضحت من قبل عدد من المنظرين بما في ذلك، من بين آخرين، تيبو دامور في باريس، ليونيد جريشوك في موسكو، تاكاشي ناكامورا في كيوتو، برنارد شوتز في ويلز، وستيوارت شابيرو في إيثاكا، نيويورك، وكليفورد ويل في سانت لفايس، وأنا.
7. أقل من دورة واحدة في الثانية تقريبًا، تمنع الأسلاك التي تعلق الكتل من الاهتزاز استجابةً للموجات.
8. في الواقع، تفاصيل التحسين أكثر تعقيدًا من هذا بكثير، وتعزيز الحساسية الناتج أصعب بكثير مما توحى به هذه الكلمات؛ ومع ذلك، هذا الوصف صحيح تقريبًا.
9. على الرغم من وجود صلة وثيقة، من خلال دريفر، بين فريق جلاسكو وكالتيك.
10. وتشمل هذه، اعتبارًا من عام 1993، مجموعة براجينسكي في موسكو، ومجموعة بقيادة بوب بايرز في جامعة ستانفورد، ومجموعة بقيادة جيم فالر في جامعة كولورادو، ومجموعة بقيادة بيتر سولسون في جامعة سيراكيوز، ومجموعة بقيادة سام فين في جامعة نورث وسترن.
11. سمي بهذا الاسم نسبة إلى مجموعة مجرات برج العذراء، والتي يمكن اكتشاف الموجات منها.

الفصل الحادي عشر : ما الواقع؟

حيث يُنظر إلى الزمكان على أنه منحني يوم الأحد ومسطح يوم الاثنين،

والآفاق مصنوعة من فراغ في أيام الأحد ومشحونة يوم الاثنين،

لكن تجارب الأحد وتجارب الاثنين تتفق في كل التفاصيل

هل الزمكان منحني في الحقيقة؟ أليس من المعقول أن يكون الزمكان مسطحًا بالفعل، لكن الساعات والمساطر التي نقيسه بها، والتي نعتبرها مثالية بالمعنى الوارد في الإطار 11.1، هي في الواقع مطاطية؟ أليس من الممكن أن تتباطأ أو تتسارع حتى أكثر الساعات اكتمالاً، وأكثر المساطر كمالات تنكمش أو تتوسع عندما ننقلها من نقطة إلى أخرى ونغير اتجاهاتها؟ ألن تؤدي مثل هذه التشوهات في ساعاتنا ومساطرنا إلى جعل الزمكان المسطح في الحقيقة يبدو منحنيًا؟

بلى.

يعطي الشكل 11.1 مثالاً ملموسًا: قياس أطوال المحيطات وأنصاف الأقطار حول ثقب أسود غير دوار. يظهر على اليسار مخطط تضمين للمساحة المنحنية للثقب. الفضاء منحني في هذا المخطط لأننا اخترنا تحديد المسافات كما لو كانت المساطر ليست مطاطية، كما لو أنها تثبت أطوالها دائمًا بصرف النظر عن المكان الذي نضعها فيه وكيف نوجهها. وتبين المساطر أن محيط أفق الثقب هو 100 كيلومتر، وترسم دائرة ضعف هذا المحيط؛ أي 200 كيلومتر، حول الثقب، وتقاس المسافة العمودية من الأفق إلى تلك الدائرة بمسطرة مثالية؛ والنتيجة هي 37 كيلومترًا. إذا كان المكان مسطحًا، فإن المسافة الشعاعية يجب أن تكون نصف قطر الدائرة الخارجية، $200/\pi$ كيلومتر، مطروحًا منه نصف قطر الأفق، $100/\pi$ كيلومتر؛ أي أنه يجب أن يكون $16 = 200/\pi - 100/\pi$ أي ما يساوي 16 كيلومترًا (تقريبًا). لاستيعاب المسافة العمودية الأكبر بكثير، وهي 37 كيلومترًا، يجب أن يكون للسطح شكل قرن البوق المنحني الموضح في الشكل التوضيحي.

الإطار 11.1

حد الكمال للمساطر (المقياس) والساعات

سأعني «بالساعات المثالية» و«المساطر المثالية»، في هذا الكتاب الساعات والمساطر المثالية بالمعنى الذي يفهمه أفضل صانعي الساعات والمساطر في العالم: يجب الحكم على الكمال من خلال المقارنة مع سلوكيات الذرات والجزيئات.

وبشكل أكثر تحديدًا، يجب أن تدق الساعات المثالية بمعدل موحد عند مقارنتها بتذبذبات الذرات والجزيئات. وقد صُممت أفضل الساعات الذرية في العالم للقيام بذلك. وبما أن تذبذبات الذرات والجزيئات يحكم فيها من خلال ما أسميته في الفصول السابقة «معدل تدفق الزمن»، فهذا يعني أن الساعات المثالية تقيس الجزء «الزمني» من الزمكان المنحني لأينشتاين.

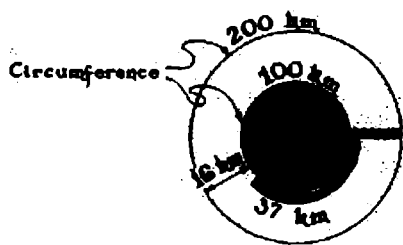
يجب أن تحتوي العلامات الموجودة على المساطر المثالية على مسافات موحدة وقياسية عند مقارنتها بالأطوال الموجية للضوء المنبعث من الذرات والجزيئات، على سبيل المثال، مسافات موحدة بالنسبة إلى الضوء «الطول الموجي 21 سم» المنبعث من جزيئات الهيدروجين. وهذا يعادل اشتراط أنه عندما يحمل المرء مسطرة عند درجة حرارة قياسية ثابتة (على سبيل المثال، صفر درجة مئوية)، فإنها تحتوي دائمًا على نفس العدد الثابت من الذرات على طولها بين العلامات؛ وهذا بدوره يضمن أن المساطر المثالية تقيس الأطوال المكانية للزمكان المنحني لأينشتاين.

يقدم نص هذا الفصل مفهوم الأزمنة «الحقيقية» والأطوال «الحقيقية». هذه ليست بالضرورة الأزمنة والأطوال المقيسة بساعات مثالية ومسطرة مثالية؛ أي ليست بالضرورة الأزمنة والأطوال بناءً على المعايير الذرية والجزيئية؛ أي ليست بالضرورة الأزمنة والأطوال المتجسدة في الزمكان المنحني لأينشتاين.

إذا كان المكان مسطحًا بالفعل حول الثقب الأسود، ولكن المساطر المثالية مطاطية وبالتالي تخدعنا للاعتقاد بأن المكان منحني، يجب أن تكون الهندسة الحقيقية للفضاء كما هي موضحة على اليمين في الشكل 11.1، وتصبح المسافة الحقيقية بين الأفق والدائرة هي 16 كيلومترًا، كما تقتضي قوانين إقليدس للهندسة المسطحة. ومع ذلك،

تصر النسبية العامة على أن المساطر المثالية لا تقيس هذه المسافة الحقيقية. خذ مسطرة وضعها بشكل محيطي حول الأفق مباشرة خارج الثقب مباشرة (مازورة سوداء سميكة منحنية مع علامات المسطرة في الجزء الأيمن من الشكل 11.1).

وعندما توجه محيطياً بهذه الطريقة، فإنها تقيس المسافة الحقيقية بشكل صحيح. اقطع المسطرة بطول 37 كيلومتراً، كما هو موضح. وهي تغطي الآن 37 بالمائة من المسافة حول الثقب. ثم أدر المسطرة بحيث تكون موجهة بشكل قطري (مازورة سوداء مستقيمة سميكة مع علامات المسطرة في الشكل 11.1). حينما تدور، تتطلب النسبية العامة أن تنكمش. عند توجيهها عمودياً، يجب أن يكون طولها الحقيقي قد انكمش إلى 16 كيلومتراً، لذلك سيصل بالضبط من الأفق إلى الدائرة الخارجية. ومع ذلك، فإن مقياس سطحه المنكمش يجب أن يدعي أن طوله لا يزال 37 كيلومتراً، وبالتالي فإن المسافة بين الأفق والدائرة هي 37 كيلومتراً. إن الأشخاص مثل أينشتاين، الذين لا يدركون طبيعة المسطرة المطاطية، وبالتالي يعتقدون أن قياسها غير دقيق، يستنتجون أن الفضاء منحني. ومع ذلك، الأشخاص مثلي ومثلك، الذين يفهمون المطاطية، يعرفون أن المسطرة قد انكمشت وأن المساحة مسطحة حقاً.



CURVED SPACETIME

FLAT SPACETIME

11.1 قياسات الطول في محيط الثقب الأسود من وجهتي نظر مختلفتين. على اليسار: يعتبر الزمكان منحنيًا في الحقيقة، والمساطر المثالية تقيس بدقة أطوال الزمكان الحقيقي. على اليمين: يعتبر الزمكان مسطحًا حقاً، والمساطر المثالية مطاطية. المسطرة المثالية التي يبلغ طولها 57 كيلومتراً، عند توجيهها في اتجاه محيطي، تقيس بدقة أطوال الزمكان الحقيقي المسطح. ومع ذلك، عند توجيهها عمودياً، فإنها تنكمش بمقدار أكبر كلما اقتربت من الثقب، وبالتالي فهي تبلغ أطوالاً عمودية أكبر من الأطوال الحقيقية (تبلغ 37 كم بدلاً من 16 كم الحقيقية في الحالة الموضحة).

ما الذي يمكن أن يجعل المسطرة تنكمش عندما يتغير اتجاهها؟ الجاذبية بالطبع. في المساحة المسطحة للنصف الأيمن من الشكل 11.1، يوجد مجال جاذبية يتحكم في أحجام الجسيمات الأساسية، والأنوية الذرية، والذرات، والجزيئات، وكل شيء، ويجبرها جميعاً على الانكماش عند وضعها بشكل قطري. يكون مقدار الانكماش كبيراً بالقرب من الثقب الأسود، وأصغر بعيداً عنه، لأن مجال الجاذبية المتحكم في الانكماش يتولد عن الثقب، ويتناقص تأثيره مع المسافة.

إن مجال الجاذبية المتحكم في الانكماش له تأثيرات أخرى. عندما يمر فوتون أو أي جسيم آخر عبر الثقب، فإن هذا المجال يسحبه ويحرّف مساره. المسار منحني حول الثقب. إنه منحني، كما قيس في هندسة الزمكان الحقيقية المسطحة للثقب. ومع ذلك، فإن أشخاصاً مثل أينشتاين، الذين يأخذون على محمل الجد قياسات مساطرهم وساعاتهم المطاطية، يعتبرون الفوتون يتحرك على طول خط مستقيم عبر الزمكان المنحني.

ما الحقيقة الحقيقية؟ هل الزمكان مسطح في الحقيقة، كما تشير الفقرات السابقة، أم أنه منحني في الحقيقة؟ بالنسبة إلى فيزيائي مثلي، هذا سؤال غير مثير للاهتمام لأنه ليس له أي تبعات فيزيائية. كلتا وجهتي النظر، الزمكان المنحني والمسطح، تعطي بالضبط نفس التنبؤات لأي قياسات باستخدام مساطر وساعات مثالية، وأيضاً (اتضح) أنها نفس التنبؤات لأي قياسات باستخدام أي نوع من الأجهزة الفيزيائية على الإطلاق. على سبيل المثال، تتفق كلتا وجهتي النظر على أن المسافة العمودية بين الأفق والدائرة في الشكل 11.1، مقيسة بمسطرة مثالية، هي 37 كيلومتراً. لكن الاختلاف حول ما إذا كانت تلك المسافة المقيسة هي المسافة «الحقيقية»، لكن مثل هذا الخلاف هو مسألة فلسفية وليست فيزيائية. وبما أن وجهتي النظر متفقتان على نتائج جميع التجارب، فإنهما متساويتان فيزيائياً. إن وجهة النظر التي تقول «الحقيقة الحقيقية» لا علاقة لها بالتجارب؛ إنها مسألة يناقشها الفلاسفة لا الفيزيائيون. بالإضافة إلى ذلك، يمكن للفيزيائيين استخدام وجهتي النظر بالتبادل عند محاولة استنتاج تنبؤات النسبية العامة.

إن العمليات العقلية التي يعمل بها الفيزيائي النظري يصفها بشكل جميل مفهوم توماس كون للمنموذج، الذي حصل على درجة الدكتوراه في الفيزياء من جامعة هارفارد عام 1949 ثم أصبح مؤرخاً بارزاً وفيلسوفاً للعلوم، وقد قدم مفهوم النموذج في كتابه الصادر عام 1962 بعنوان «بنية الثورات العلمية» - وهو أحد أكثر الكتب الثابتة التي قرأتها على الإطلاق.

النموذج هو مجموعة كاملة من الأدوات التي يستخدمها مجتمع من العلماء في أبحاثه حول موضوع ما، وفي توصيل نتائج أبحاثه إلى الآخرين. تعتبر وجهة نظر الزمكان المنحنى في النسبية العامة نموذجًا واحدًا؛ وجهة نظر الزمكان المسطحة هي وجهة نظر أخرى. يتضمن كل نموذج من هذه النماذج ثلاثة عناصر أساسية: مجموعة من قوانين الفيزياء المصاغة رياضياً؛ مجموعة من الصور (صور ذهنية، صور لفظية، رسومات على الورق) تعطينا فكرة عن القوانين وتساعدنا على التواصل مع بعضنا؛ ومجموعة من النماذج -الحسابات السابقة والمسائل التي حُلّت، إما في الكتب المدرسية أو في المقالات العلمية المنشورة، والتي يتفق مجتمع خبراء النسبية على أنها صحيحة شكلاً ومثيرة للاهتمام، والتي نستخدمها كنماذج لحساباتنا المستقبلية.

يعتمد نموذج الزمكان المنحني على ثلاث مجموعات من القوانين المصاغة رياضياً: معادلة المجال لأينشتاين، التي تصف كيف تولد المادة انحناء الزمكان؛ القوانين التي تخبرنا أن المساطر المثالية والساعات المثالية تقيس أطوال وأزمنة الزمكان المنحني لأينشتاين؛ والقوانين التي تخبرنا كيف تتحرك المادة والمجال عبر الزمكان المنحني، على سبيل المثال، إن الأجسام المتحركة بحرية تنتقل على طول خطوط مستقيمة (الجيوديسيا). يعتمد نموذج الزمكان المسطح أيضاً على ثلاث مجموعات من القوانين: قانون يصف كيف تولد المادة، في الزمكان المسطح، مجال الجاذبية؛ القوانين التي تصف كيف يتحكم هذا المجال في انكماش المساطر المثالية وتمدد معدلات دقات الساعات المثالية؛ والقوانين التي تصف كيف يتحكم مجال الجاذبية أيضاً في حركات الجسيمات والمجالات عبر الزمكان المسطح.

تشتمل الصور الموجودة في نموذج الزمكان المنحني على مخططات التضمين المرسومة في هذا الكتاب (على سبيل المثال، النصف الأيسر من الشكل 11.1)، والأوصاف اللفظية لانحناء الزمكان حول الثقوب السوداء (على سبيل المثال، «دوامة المكانة الشبيهة بالإعصار حول ثقب أسود يلف محورياً»). تتضمن الصور في نموذج الزمكان المسطح، النصف الأيمن من الشكل 11.1، مع المسطرة التي تنكمش عندما تتحول من الاتجاه المحيطي إلى الاتجاه العمودي، والوصف اللفظي لـ «مجال الجاذبية الذي يتحكم في انكماش المساطر».

تشمل أمثلة نموذج الزمكان المنحني الحسابات الموجودة في معظم الكتب المرجعية

لنسبية، والتي من خلالها يشتق المرء حل سفارتشيلد لمعادلة مجال أينشتاين، والحسابات التي استنتج بها إسرائيل وكارتر وهو كينج وآخرون أن الثقب الأسود ليس له «شعر». تشتمل نماذج الزمكان المسطح على حسابات الكتب المرجعية لكيفية تغير كتلة الثقب الأسود أو أي جسم آخر عندما تلتقطه موجات الجاذبية، وحسابات كليفورديل، وتيولت دامور، وآخرين حول كيفية توليد النجوم النيوترونية، التي بدور بعضها حول بعض، موجات الجاذبية (الموجات الناتجة من انكماش المجال).

كل جزء من النموذج -قوانينه، وصوره، وأمثله- أمر بالغ الأهمية لعملياتي العقلية عندما أبحث. الصور (العقلية واللفظية وكذلك على الورق) تعمل بمثابة بوصلة عامة. إنها تعطيني حدسًا حول كيفية تصرف الكون على الأرجح؛ أتلاعب بها، جنبًا إلى جنب مع رسومات الشعار المبتكرة الرياضية، بحثًا عن رؤى جديدة مثيرة للاهتمام. إذا وجدت، من خلال الصور ورسومات الشعار المبتكرة، رؤية تستحق المتابعة (على سبيل المثال، حدسية الطوق في الفصل السابع)، فإنني أحاول التحقق منها أو دحضها من خلال حسابات رياضية دقيقة تعتمد على قوانين الفيزياء المصاغة رياضياً للنموذج. أصمم حساباتي الدقيقة وفقًا لأمثلة النموذج. إنها تخبرني عن مستوى الدقة الحسابية التي من المحتمل أن تكون مطلوبة للحصول على نتائج موثوقة. (إذا كانت الدقة ضعيفة للغاية، فقد تكون النتائج خاطئة؛ وإذا كانت الدقة عالية للغاية، فقد تستهلك الحسابات وقتًا ثمينًا من دون داع). تخبرني النماذج أيضًا عن أنواع التلاعبات الرياضية التي من المحتمل أن تساعدني في اجتياز مستنقع الرموز الرياضية للوصول إلى هدفي. إذا أثبتت الحسابات رؤيتي الجديدة أو على الأقل جعلتها معقولة، فإنني أوصول هذه الرؤية إلى خبراء النسبية من خلال مزيج من الصور والحسابات، وأوصلها إلى الآخرين، مثل قراء هذا الكتاب، فقط من خلال الصور -الصور والرسومات اللفظية.

يمكن استخلاص قوانين الفيزياء لنموذج الزمكان المسطح، رياضياً، من قوانين نموذج الزمكان المنحني، والعكس. وهذا يعني أن مجموعتي القوانين عبارة عن تمثيلات رياضية مختلفة لنفس الظواهر الفيزيائية، إلى حد ما بنفس معنى أن 0.001 هي $1/1000$ ، كما أنهما تمثيلات رياضية مختلفة لنفس الرقم. ومع ذلك، فإن الصيغ الرياضية للقوانين تبدو مختلفة تمامًا في التمثيلين، كما أن الصور والنماذج المصاحبة لمجموعتي القوانين تبدو مختلفة تمامًا. على سبيل المثال، في نموذج الزمكان المنحني، الصورة اللفظية لمعادلة المجال

لأينشتاين هي عبارة أن «الكتلة تولد انحناء الزمكان». عند ترجمتها إلى لغة نموذج الزمكان المسطح، توصف معادلة المجال هذه بالصورة اللفظية: «تولد الكتلة مجال الجاذبية الذي يحكم انكماش المساطر وتمدد دقات الساعات». على الرغم من أن نسختي معادلة مجال أينشتاين متكافئتان رياضياً، فإن صورهما اللفظية تختلف اختلافاً عميقاً.

ومن المفيد للغاية، في الأبحاث النسبية، أن يكون كلا النموذجين في متناول اليد. تحل بعض المشكلات بسهولة وسرعة أكبر باستخدام نموذج الزمكان المنحني؛ والبعض الآخر باستخدام الزمكان المسطح. تعد مشكلات الثقب الأسود (على سبيل المثال، اكتشاف أن الثقب الأسود ليس له شعر) أكثر قابلية للتكيف مع تقنيات الزمكان المنحني؛ إن مشكلات موجات الجاذبية (على سبيل المثال، حساب الموجات الناتجة عندما يدور أحد نجمين نيوترونيين حول آخر) هي الأكثر قابلية للتكيف مع تقنيات الزمكان المسطح. عندما ينضج علماء الفيزياء النظرية، يبنون تدريجياً نظرة ثاقبة حول أي نموذج سيكون الأفضل لأي موقف، ويتعلمون قلب عقولهم ذهاباً وإياباً من نموذج إلى آخر، حسب الحاجة. قد يعتبرون الزمكان منحنيًا يوم الأحد عند التفكير في الثقوب السوداء، ومسطحًا يوم الاثنين عند التفكير في موجات الجاذبية. يشبه هذا التقلب الذهني ما يختبره المرء عند النظر إلى رسم لموريتس كورنيليس إشر، على سبيل المثال، الشكل 11.2.

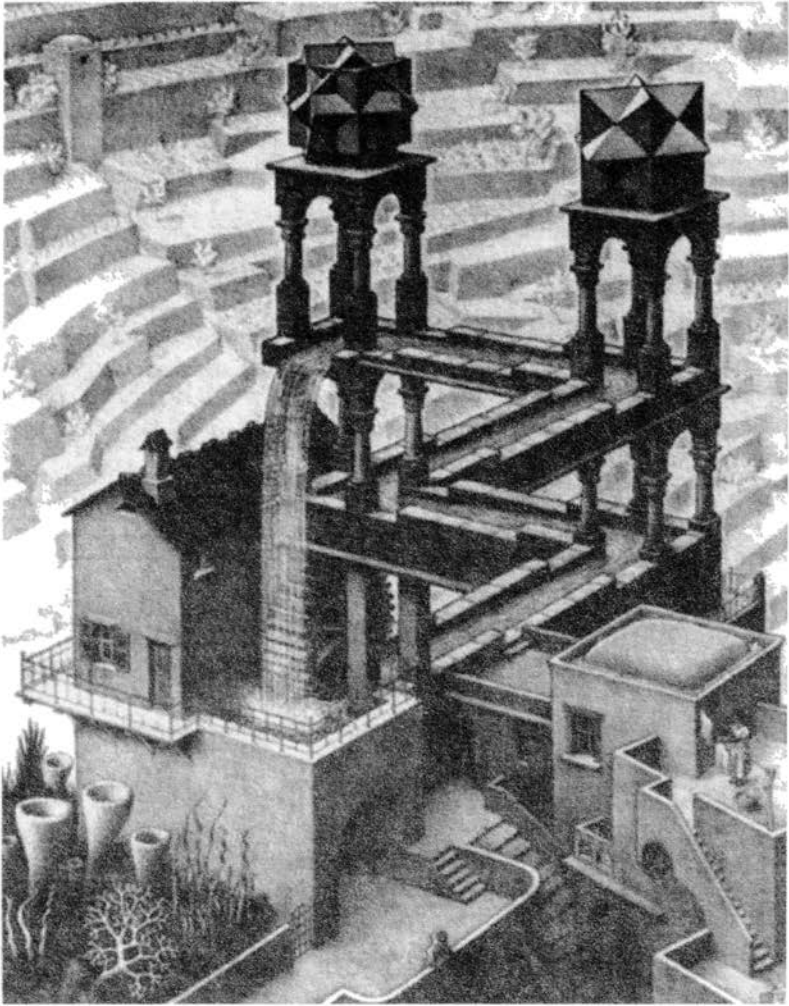
وبما أن القوانين التي تكمن وراء النموذجين متكافئة رياضياً، يمكننا التأكد من أنه عندما يُحلَّل نفس الوضع المادي باستخدام كلا النموذجين، فإن التنبؤات بنتائج التجارب ستكون متطابقة تمامًا. وبالتالي نحن أحرار في استخدام النموذج الذي يناسبنا في أي موقف معين.

هذه الحرية تحمل القوة. ولهذا السبب لم يكتفِ الفيزيائيون بنموذج الزمكان المنحني لأينشتاين، وطوّروا نموذج الزمكان المسطح كمكمل له.

إن وصف نيوتن للجاذبية هو نموذج آخر. فهو يعتبر المكان والزمن مطلقين، والجاذبية قوة تعمل بشكل آني بين جسمين «(الفعل عن بُعد)»، الفصلان الأول والثاني).

إن نموذج فيزياء الجاذبية، بطبيعة الحال، لا يعادل نموذج الزمكان المنحني لأينشتاين؛ يقدم الاثنان تنبؤات مختلفة لنتائج التجارب. يستخدم توماس كون عبارة الثورة العلمية لوصف الصراع الفكري الذي اخترع به أينشتاين نموذجاً وأقنع زملاءه بأنه يعطي وصفاً

أقرب إلى الصحة للجاذبية من نموذج فيزياء نيوتن (الفصل الثاني). لم يكن اختراع الفيزيائيين لنموذج الزمكان المسطح ثورة علمية بالمعنى الذي قصده كون، لأن نموذج الزمكان المسطح ونموذج الزمكان المنحني يعطيان نفس التنبؤات بالضبط.



11.2 رسم لإيشار. يمكن للمرء أن يختبر تقلباً ذهنياً من خلال النظر إلى هذا الرسم، أولاً من وجهة نظر واحدة (على سبيل المثال، مع التيار المتدفق على نفس ارتفاع قمة الشلال)، ثم من وجهة نظر أخرى (مع التيار في ذروة قاع الشلال). تشبه هذه الواجهة الذهنية إلى حد ما تلك التي يختبرها الفيزيائي النظري عند التحول من نموذج الزمكان المنحني إلى نموذج الزمكان المسطح.

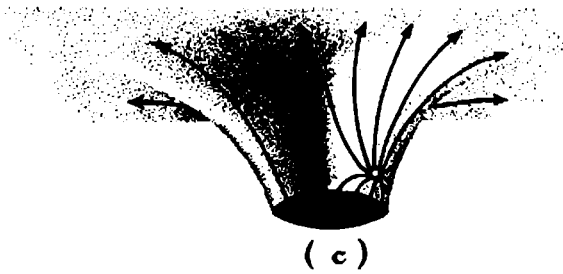
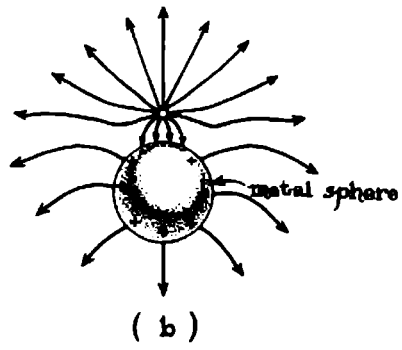
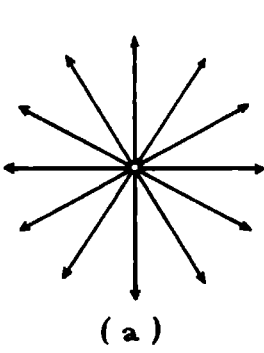
[© 1961 مؤسسة إم سي إيشر - بارن هولاند. كل الحقوق محفوظة].

عندما تكون الجاذبية ضعيفة، فإن تنبؤات نموذج فيزياء نيوتن ونموذج الزمكان المنحني لأينشتاين تكون متطابقة تقريبًا، وبالتالي يكون النموذجان متكافئين تقريبًا من الناحية الرياضية. وهكذا، عند دراسة الجاذبية في النظام الشمسي، غالبًا ما ينتقل الفيزيائيون ذهابًا وإيابًا من دون عقاب بين نموذج فيزياء نيوتن، ونموذج الزمكان المنحني، وأيضًا نموذج الزمكان المسطح، مستخدمين في أي وقت أيها يلفت انتباههم وأبها يبدو أكثر إلهامًا¹.

في بعض الأحيان يكون الأشخاص الجدد في مجال البحث أكثر انفتاحًا من الأشخاص القدامى. كانت هذه هي الحال في السبعينيات، عندما كان لدى الأشخاص الجدد رؤية أدت إلى نموذج جديد للثقوب السوداء، وهو نموذج الغشاء.

في عام 1971، لاحظ ريتشارد هاني، وهو طالب جامعي في جامعة برينستون، بالتعاون مع ريمو روفيني، وهو باحث ما بعد الدكتوراه، أن أفق الثقب الأسود يمكن أن يتصرف إلى حد ما مثل كرة موصلة للكهرباء. لفهم هذا السلوك الغريب، تذكر أن الحبيبة المعدنية ذات الشحنة الموجبة تحمل مجالًا كهربائيًا يطرد البروتونات ولكنه يجذب الإلكترونات. يمكن وصف المجال الكهربائي للحبيبات من خلال خطوط المجال، المشابهة لخطوط المجال المغناطيسي. تشير خطوط المجال الكهربائي إلى اتجاه القوة التي يؤثر بها المجال على البروتون (وبعكس القوة المؤثرة على الإلكترون)، وتناسب كثافة خطوط المجال مع شدة القوة. إذا كانت الحبيبة وحدها في الزمكان المسطح، فإن خطوط مجالها الكهربائي تشير إلى الخارج بشكل قطري (الشكل 11.3 a). في المقابل، فإن القوة الكهربائية المؤثرة على البروتون تتجه شعاعيًا بعيدًا عن الحبيبة، وبما أن كثافة خطوط المجال تتناقص عكسيًا مع مربع المسافة من الحبيبة، فإن القوة الكهربائية المؤثرة على البروتون تتناقص أيضًا عكسيًا مع مربع المسافة.

الآن قُرب الحبيبة من كرة معدنية (الشكل 11.3 b). يتكون السطح المعدني للكرة من إلكترونات يمكنها التحرك على الكرة بحرية، لكن لا تستطيع ذلك الأيونات موجبة الشحنة. يسحب المجال الكهربائي للحبيبات عددًا من إلكترونات الكرة إلى المنطقة المجاورة للحبيبات، تاركًا أيونات زائدة في كل مكان آخر على الكرة؛ وبعبارة أخرى، فإنه يستقطب² الكرة.



11.3 (a) خطوط المجال الكهربائي التي تنتجها حبيبات معدنية موجبة الشحنة في حالة سكون، وحدها، في الزمكان المسطح. (b) خطوط المجال الكهربائي عندما تكون الحبيبة في حالة سكون فوق كرة معدنية موصلة للكهرباء في الزمكان المسطح. المجال الكهربائي للكريات يستقطب الكرة. (c) خطوط المجال الكهربائي عندما تكون الحبيبة في حالة سكون فوق أفق الثقب الأسود مباشرة. يبدو أن المجال الكهربائي للكريات يستقطب الأفق.

في عام 1971، حسب هاني وروفيني، وبشكل مستقل عن روبرت والد من جامعة برينستون وجيف كوهين من معهد برينستون للدراسات المتقدمة، أشكال خطوط المجال الكهربائي التي تنتجها حبيبة مشحونة بالقرب من أفق ثقب أسود لا يلف محوريًا. كشفت حساباتهم، المبينة على نموذج الزمكان المنحني القياسي، أن انحناء الزمكان يشوه خطوط المجال بالطريقة الموضحة في الشكل 11.3 c. لاحظ هاني وروفيني التشابه مع خطوط المجال في الشكل 11.3 b [انظر إلى الرسم البياني (c) من الأسفل، وسيكون تقريبًا نفس الرسم البياني (b)]، واقترحا أنه يمكننا التفكير في أفق الثقب الأسود بنفس الطريقة التي نفكر بها في الكرة المعدنية؛ أي أننا يمكن أن نعتبر الأفق غشاءً رقيقًا يتكون

من جزئيات موجبة وسالبة الشحنة، وهو غشاء يشبه معدن الكرة. عادة هناك أعداد متساوية من الجزئيات الموجبة والسالبة في كل مكان على الغشاء؛ أي أنه لا توجد شحنة صافية على أي منطقة من الغشاء. ومع ذلك، عندما تقترب الحبيبة من الأفق، تتحرك الجزئيات السالبة الزائدة إلى المنطقة الموجودة أسفل الحبيبة، تاركة الجزئيات الموجبة الزائدة في كل مكان آخر على الغشاء؛ وبذلك يصبح غشاء الأفق مستقطباً؛ ومجموع خطوط المجال الناتجة عن شحنات الكرية والشحنات الأفقية تأخذ شكل الشكل (c).

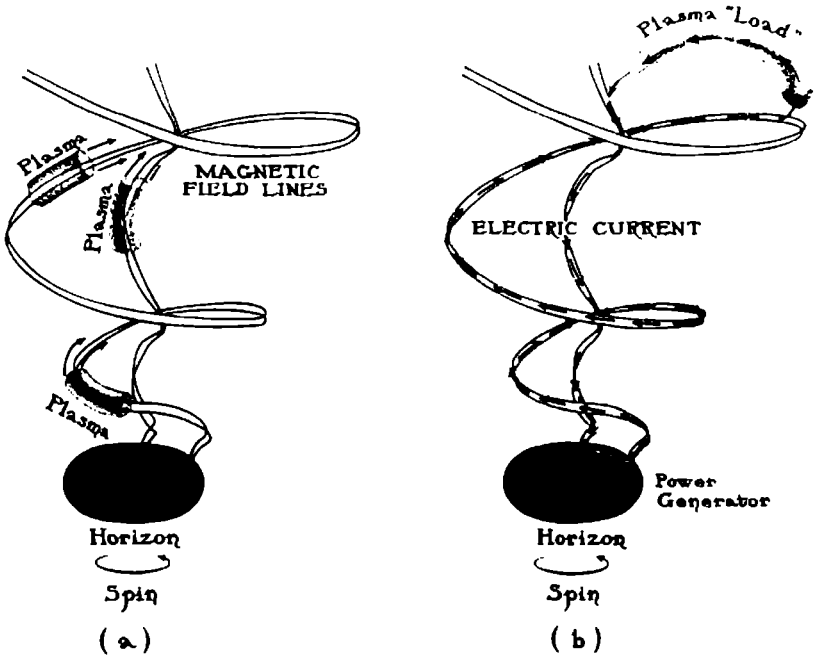
عندما سمعت هذه القصة، باعتباري خبيراً في النظرية النسبية، اعتقدت أنها سخيفة. تصر النسبية العامة على أنه إذا سقط شخص ما في ثقب أسود، فلن يواجه أي شيء في الأفق سوى انحناء الزمكان. لن يرى المرء أي غشاء ولا جسيمات مشحونة. وبالتالي، فإن وصف هاني-روفيني لسبب انحناء خطوط المجال الكهربائي للكربات لا يمكن أن يكون له أي أساس في الواقع. إنه خيال خالص. كنت متأكداً من أن سبب انحناء خطوط المجال هو انحناء الزمكان ولا شيء آخر: تنحني خطوط المجال نحو الأفق في الرسم البياني (c) فقط لأن المد والجزر بفعل الجاذبية يسحبانها، وليس لأنها تنجذب إلى بعض الشحنات المستقطبة في الأفق. لا يمكن للأفق أن يمتلك مثل هذه الشحنة المستقطبة؛ كنت متأكداً من ذلك. وكنت مخطئاً.

وبعد خمس سنوات اكتشف روجر بلانديفورد وطالب الدراسات العليا رومان زناجيك في جامعة كامبريدج أن المجالات المغناطيسية يمكن أن تستخرج طاقة اللف المحوري للثقب الأسود، وتستخدمها لتشغيل النفثات (عملية بلانديفورد-زناجيك، الفصل التاسع والشكل a 11.4). كما وجد بلانديفورد وزناجيك من خلال حسابات الزمكان المنحنية أنه مع استخراج الطاقة، تندفق التيارات الكهربائية إلى الأفق بالقرب من أقطاب الثقب (على شكل جسيمات موجبة الشحنة تسقط نحو الداخل)، وتندفق التيارات خارج الأفق بالقرب من خط الاستواء (على شكل جسيمات سالبة الشحنة تتساقط نحو الداخل). كان الأمر كما لو أن الثقب الأسود جزء من دائرة كهربائية.

بالإضافة إلى ذلك، أظهرت الحسابات أن الثقب يتصرف كما لو كان مولد جهد في الدائرة (الشكل b 11.4). يدفع مولد الجهد الموجود في الثقب الأسود التيار خارج خط استواء الأفق، ثم إلى أعلى خطوط المجال المغناطيسي إلى مسافة كبيرة من الثقب، ثم عبر البلازما (غاز ساخن موصل للكهرباء) إلى خطوط المجال الأخرى بالقرب من محور دوران الثقب، ثم إلى أسفل خطوط المجال وإلى الأفق. كانت خطوط المجال

المغناطيسي هي أسلاك الدائرة الكهربائية، وكانت البلازما هي الحمل الذي يستخرج الطاقة من الدائرة، وكان الثقب الدوار هو مصدر الطاقة.

من وجهة النظر هذه (الشكل 11.4 b)، فإن الطاقة التي تحملها الدائرة هي التي تعمل على تسريع البلازما لتكوين نفثات. من وجهة نظر الفصل التاسع (الشكل 11.4 a)، فإن خطوط المجال المغناطيسي الدوارة، التي تدور باستمرار، هي التي تعمل على تسريع البلازما. وجهتا النظر هما مجرد طريقتين مختلفتين للنظر إلى نفس الشيء. تأتي القدرة في النهاية من دوران الثقب في كلتا الحالتين. سواء فكرنا في القدرة التي تحملها الدائرة أو التي تحملها خطوط المجال الدوارة، فهي مسألة تذوق.



11.4 وجهتا نظر حول عملية بلانديفورد-زناجيك التي يمكن من خلالها ثقب أسود ممغنط دوار أن ينتج نفثات. (a) يؤدي دوران الثقب إلى خلق دوامة من الفضاء تجبر المجالات المغناطيسية التي تربط الثقب على الدوران. ثم تعمل قوى الطرد المركزي لحقول الغزل على تسريع البلازما إلى سرعات عالية (قارن مع الشكل 9.7 b). (d) تولد المجالات المغناطيسية ودوامة الفضاء معاً فرقاً كبيراً في الجهد بين قطبي الثقب وخط الاستواء؛ في الواقع، يصبح الثقب مولداً للجهد والطاقة. هذا الجهد يدفع التيار للتدفق في الدائرة. تحمل الدائرة الطاقة الكهربائية من الثقب الأسود إلى البلازما، وهذه الطاقة تعمل على تسريع البلازما إلى سرعات عالية.

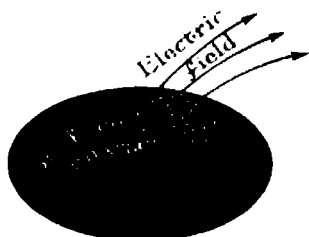
كان وصف الدائرة الكهربائية، على الرغم من استناده إلى قوانين فيزياء الزمكان المنحنية القياسية، غير متوقع على الإطلاق، وبدأ تدفق التيار عبر الثقب الأسود -إلى الداخل بالقرب من القطبين وإلى الخارج بالقرب من خط الاستواء- غريباً للغاية. خلال عامي 1977 و1978، حيرت هذه الخصوصية زناجيك، وبشكل مستقل، نيو دامور (الذي حصل على درجة الدكتوراه مؤخرًا من مرصد باريس في فرنسا). في أثناء محاولتهما لفهما، ترجما بشكل مستقل معادلات الزمكان المنحنية، التي تصف الثقب الدوار ومجال البلازما والمغناطيسي له، إلى شكل غير مألوف مع تفسير تصويري مثير للاهتمام: التيار، عندما يصل إلى الأفق، لا يدخل الثقب. وبدلاً من ذلك، فإنه يلتصق بالأفق، حيث يحمل بواسطة الشحنات الأفقية التي تخيلها هاني وروفيني سابقاً. ويتدفق هذا التيار الأفقي من القطب إلى خط الاستواء، حيث يخرج إلى أعلى خطوط المجال المغناطيسي. بالإضافة إلى ذلك، اكتشف دامور وزناجيك، أن القوانين التي تحكم شحنة الأفق والتيار هي نسخ أنيقة من قوانين الزمكان المسطحة للكهرباء والمغناطيسية: وهي قانون جاوس، وقانون أمبير، وقانون أوم، وقانون حفظ الشحنة (الشكل 11.5).

ولم يؤكد دامور وزناجيك أن الكائن الذي يسقط في الثقب الأسود سيواجه أفقاً يشبه الغشاء بشحنات وتيارات كهربائية. وبدلاً من ذلك، أكدوا أنه إذا رغب المرء في معرفة كيفية تصرف الكهرباء والمغناطيسية والبلازما خارج الثقب الأسود، فمن المفيد اعتبار الأفق بمثابة غشاء به شحنات وتيارات.

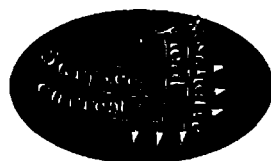
عندما قرأت المقالات الفنية لدامور وزناجيك، فهمت فجأة: إنهما، ومن قبلهما هاني وروفيني، كانوا يكتشفون أسس نموذج جديد للثقوب السوداء. كان النموذج رائعاً. لقد أسرني. ولعجزي عن مقاومة جاذبيته، أمضيت معظم فترة الثمانينيات، مع ريتشارد بريس، ودوجلاس ماكدونالد، وإيان ريدمانت، وواي موسوين، ورونالد كراولي، وآخرين، في تحويله إلى شكل مصقول وتأليف كتاب عنه. الثقوب السوداء: نموذج الغشاء.

إن قوانين فيزياء الثقب الأسود، المكتوبة في نموذج الغشاء هذا، تعادل تمامًا القوانين المقابلة لنموذج الزمكان المنحني، ما دام الاهتمام يقتصر على المظهر الخارجي للثقب. وبالتالي، فإن النموذجين يعطيان بالضبط نفس التنبؤات لنتائج جميع التجارب أو البيانات الرصدية التي قد يقوم بها أي شخص خارج الثقب الأسود، بما في ذلك جميع البيانات الرصدية الفلكية التي تُجرى من الأرض. عند التفكير في علم الفلك والفيزياء الفلكية،

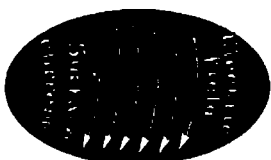
أجد أنه من المفيد الاحتفاظ بكلا النموذجين في متناول اليد، الغشاء والزمكان المنحني، والقيام بالتقليب الذهني من نوع إيشر (الفنان التشكيلي الهولندي) ذهابًا وإيابًا بينهما. قد يكون نموذج الزمكان المنحني، بأفائه المصنوعة من الزمكان الفارغ المنحني، مفيدًا يوم الأحد، عندما أحتار بشأن نبضات الثقوب السوداء. قد يكون نموذج الغشاء، ذو الآفاق المصنوعة من أغشية مشحونة كهربائيًا، مفيدًا يوم الاثنين، عندما أتحير بشأن إنتاج الثقب الأسود للنفاثات. وبما أن تنبؤات النموذجين مضمونة لتكون نفسها، فيمكنني استخدام كل يوم أيهما يناسب احتياجاتي.



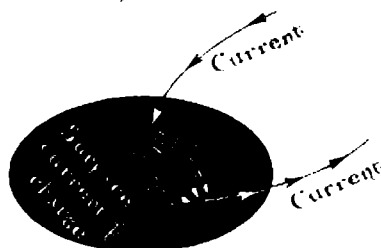
(a) Gauss's Law



(b) Ampère's Law



(c) Ohm's Law



(d) Charge Conservation

11.5 القوانين التي تحكم الشحنة الكهربائية والتيار في الأفق الشبيه بغشاء الثقب الأسود: (a) قانون جاوس - الأفق لديه بالضبط الكمية المناسبة من الشحنة السطحية لإنهاء جميع خطوط المجال الكهربائي التي تقاطع مع الأفق، لذلك لا تمتد إلى داخل الثقب، قارن مع الشكل 11.3. (b) قانون أمبير - الأفق لديه بالضبط المقدار المناسب من التيار السطحي لإنهاء ذلك الجزء من المجال المغناطيسي الموازي للأفق، لذلك لا يوجد مجال مواز تحت الأفق. (c) قانون أوم - يتناسب التيار السطحي مع جزء المجال الكهربائي الذي يكون متماسًا مع السطح؛ ثابت التناسب هو المقاومة 377Ω . (d) حفظ الشحنة - لا تفقد أو تنشأ أي شحنة على الإطلاق؛ كل الشحنة الموجبة التي تدخل الأفق من الكون الخارجي تصبح مرتبطة بالأفق، وتنحرف حوله، حتى تخرج مرة أخرى إلى الكون الخارجي (على شكل شحنة سالبة تسقط إلى الداخل لتحيد الشحنة الموجبة).

ليس الأمر كذلك داخل الثقب الأسود. وأي كائن يقع في الثقب سيكتشف أن الأفق ليس غشاء مشحونًا، وأن نموذج الغشاء داخل الثقب يفقد قوته تمامًا. ومع ذلك، تدفع الكائنات الساقطة ثمنًا لاكتشاف ذلك: لا يمكنها نشر اكتشافها في المجالات العلمية للكون الخارجي.

1. قارن مع القسم الأخير من الفصل الأول، «طبيعة القانون الفيزيائي».

2. هذا استخدام مختلف لكلمة «استقطاب» عن استخدام «موجات الجاذبية المستقطبة» و«الضوء المستقطب» (الفصل العاشر).

الفصل الثاني عشر: تبخر الثقوب السوداء

حيث أفق الثقب الأسود يرتدي غلافًا جويًا
من الإشعاع والجسيمات الساخنة التي تتبخر ببطء،
ثم ينكمش الثقب ثم ينفجر

نمو الثقوب السوداء

بينما كان ستيفن هوكينج يستعد للنوم، قفزت الفكرة في ذهنه ذات مساء من شهر نوفمبر عام 1970. لقد ضربته بقوة لدرجة أنها تركته يلهث تقريبًا للحصول على الهواء. لم يحدث من قبل أو منذ ذلك الحين أن تأتيه فكرة بهذه السرعة.

التحضير للنوم لم يكن سهلاً. يعاني جسد هوكينج من مرض التصلب الجانبي الضموري (ALS)، وهو مرض يدمر تدريجيًا الأعصاب التي تتحكم في عضلات الجسم ويترك العضلات، واحدة تلو الأخرى، تفرق في الشلل. كان يتحرك ببطء، وساقاه تتأرجحان، ويد واحدة على الأقل تمسك بقوة بسطح المنضدة أو عمود السرير، في حين ينظف أسنانه، ويخلع ملابسه، ويكافح في ارتداء ملابس النوم، ويصعد إلى السرير. في ذلك المساء تحرك ببطء أكثر من المعتاد، لأن عقله كان منشغلاً بالفكرة. لقد أثارته الفكرة. كان متشياً، لكنه لم يخبر زوجته جين؛ هذا من شأنه ألا يجعله ممتدحاً منها، لأنه من المفترض أن يركز على الذهاب إلى السرير.

ظل مستيقظاً لعدة ساعات في تلك الليلة. لم يستطع النوم. ظل عقله يتجول حول تداعيات الأفكار، وارتباطاتها بأشياء أخرى.

لقد حفز الفكرة سؤال بسيط. ما مقدار إشعاع الجاذبية (تموجات انحناء الزمكان) الذي يمكن أن ينتجه ثقبان أسودان، عندما يتصادمان ويتحدان لتكوين ثقب واحد؟ كان هوكينج يدرك بشكل غامض لبعض الوقت أن الثقب الأخير الوحيد يجب أن يكون أكبر،

إلى حد ما، من «مجموع» الثقبين الأصليين، ولكن بأي معنى، وبماذا يمكن أن يخبره ذلك عن مقدار الإشعاع بفعل الجاذبية الناتج؟

ثم، بينما يستعد للنوم أصابت رأسه الفكرة. وفجأة، اجتمعت سلسلة من الصور الذهنية والرسوم البيانية في ذهنه لنتج الفكرة: كانت مساحة أفق الثقب هي التي ستكون أكبر. وقال إنه متأكد من ذلك؛ لقد دمج الصور والرسوم البيانية في دليل رياضي لا جدال فيه. بصرف النظر عن كتلتي الثقبين الأصليين (متطابقتين أو مختلفتين تمامًا)، وبصرف النظر عن كيفية دوران الثقبين (في نفس الاتجاه أو في الاتجاه المعاكس أو لا يدوران على الإطلاق)، وبصرف النظر عن كيفية تصادم الثقبين (وجهًا لوجه أو بزاوية خاطفة)، يجب أن تكون مساحة أفق الثقب النهائي دائمًا أكبر من مجموع مساحات آفاق الثقوب الأصلية. وماذا في ذلك؟ بينما كان عقله يتجول حول تداعيات نظرية زيادة المساحة، أدرك هو كينج الكثير.

أولاً، لكي تكون لأفق الثقب الأخير مساحة كبيرة، يجب أن تكون للثقب الأخير كتلة كبيرة (أو ما يعادلها من طاقة كبيرة)، مما يعني أنه لا يمكن إخراج الكثير من الطاقة، على شكل إشعاع الجاذبية. ولكن «ليس الكثير» ما زال هناك القليل جدًا. ومن خلال الجمع بين نظرية زيادة المساحة الجديدة ومعادلة تصف كتلة الثقب الأسود من حيث مساحة سطحه ولفه المحوري، استنتج هو كينج أن ما يصل إلى 50٪ من كتلة الثقبين الأصليين يمكن تحويلها إلى طاقة أمواج الجاذبية، ومحتفظة بما لا يقل عن 50 بالمائة من كتلة الثقب النهائية.

كانت هناك تداعيات أخرى أدركها هو كينج في الأشهر التي تلت ليلة الأرق في نوفمبر. ربما كان الأمر الأهم هو تقديم إجابة جديدة لسؤال كيفية تحديد مفهوم أفق الثقب عندما يكون الثقب «ديناميكياً»؛ أي عندما يهتز بشدة (كما يجب أن يحدث في أثناء الاصطدامات)، أو عندما ينمو بسرعة (كما حدث عندما نشأ لأول مرة بواسطة نجم متفجر).

التعريفات الدقيقة والمثمرة ضرورية لأبحاث الفيزياء. فقط بعد أن حدد هيرمان مينكوفسكي الفاصل الزمني المطلق بين حدثين (الإطار 2.1)، تمكن من استنتاج أنه على الرغم من أن المكان والزمن «نسبيان»، فإنهما متحدان في الزمكان «المطلق». فقط

بعد أن حدد أينشتاين مسارات الجسيمات المتساقطة بحرية على أنها خطوط مستقيمة (الشكل 2.2)، تمكن من استنتاج أن الزمكان منحني (الشكل 5.2)، وبالتالي طوّر قوانين النسبية العامة الخاصة به. وفقط بعد أن حدد هوكينج مفهوم أفق الثقب الديناميكي، تمكن هو وآخرون من استكشاف كيفية تغير الثقوب السوداء عندما تضرب بالاصطدامات أو بالحطام المتساقط.

قبل نوفمبر 1970، كان معظم الفيزيائيين، على غرار روجر بنروز، يعتقدون أن أفق الثقب هو «الموقع الخارجي الذي تنجذب فيه الفوتونات التي تحاول الهروب من الثقب إلى الداخل بفعل الجاذبية». هذا التعريف القديم للأفق كان طريقًا فكريًا مسدودًا، كما أدرك هوكينج في الأشهر التالية، ولوصفه على هذا النحو، أعطاه اسمًا جديدًا، يحمل ازدراءً بعض الشيء، اسمًا سيظل عاليًا. وسمّاه الأفق الظاهري².

كان لازدراء هوكينج عدة جذور. أولاً، الأفق الظاهري هو مفهوم نسبي، وليس مطلقًا. ويعتمد موقعه على الإطار المرجعي للمراقبين؛ قد يراه المراقبون الذين يسقطون في الثقب في مكان مختلف عن المراقبين الساكنين خارج الثقب. ثانيًا، عندما تسقط المادة في الثقب، يمكن للأفق الظاهري أن يقفز فجأة، من دون سابق إنذار، من مكان إلى آخر -وهو سلوك غريب إلى حد ما، ولا يفضي إلى رؤى سهلة. ثالثًا، وهو الأهم، لم يكن للأفق الظاهري أي علاقة على الإطلاق بوميض الصور الذهنية والرسوم البيانية المتجمدة التي أنتجت فكرة هوكينج الجديدة.

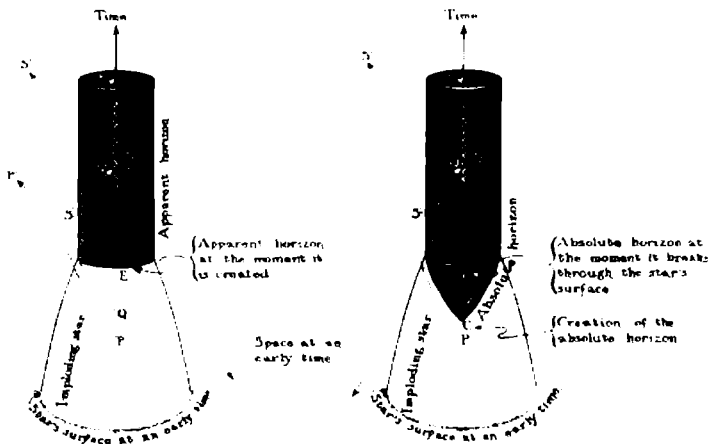
وعلى النقيض من ذلك، كان تعريف هوكينج الجديد للأفق مطلقًا (وهو نفسه في جميع الأطر المرجعية)، وليس نسبيًا، لذلك أطلق عليه اسم الأفق المطلق. يعتقد هوكينج أن هذا الأفق المطلق جميل. وله تعريف جميل: إنه «الحدود في الزمكان بين الأحداث (خارج الأفق) التي يمكنها إرسال إشارات إلى الكون البعيد، في الوقت الذي لا تستطيع فيه الحدود (داخل الأفق) ذلك». وله تطور جميل: عندما يأكل ثقب مادة أو يصطدم بثقب آخر أو يفعل أي شيء على الإطلاق، فإن أفقه المطلق يتغير شكله وحجمه بطريقة سلسلة ومستمرة، بدلًا من طريقة القفز المفاجئ (الإطار 12.1). والأهم من ذلك هو أن الأفق المطلق ينسجم بشكل مثالي مع فكرة هوكينج الجديدة:

الإطار 12.1

الأفق المطلق والظاهري لثقب أسود حديث الولادة

تصف مخططات الزمكان الموضحة أدناه الانفجار الداخلي لنجم كروي ليشكل ثقباً أسود كروياً؛ قارن مع الشكل 6.7. المنحنيات المنقطة هي أشعة الضوء الصادرة؛ وبعبارة أخرى، الخطوط العالمية (مسارات عبر الزمكان) للفوتونات، وهي أسرع الإشارات التي يمكن إرسالها بشكل قطري إلى الخارج، نحو الكون البعيد. لتحقيق الهروب الأمثل، نجعل الفوتونات مثالية بحيث لا تمتص أو تتناثر على الإطلاق بواسطة مادة النجم.

الأفق الظاهري (الرسم البياني الأيسر) هو الموقع الخارجي حيث تسحب أشعة الضوء الخارجة، التي تحاول الهروب من الثقب، إلى الداخل نحو المفردة (على سبيل المثال، الأشعة الصادرة من QQ' و RR'). ينشأ الأفق الظاهري فجأة، بالحجم الكامل. عند E ، حيث ينكمش سطح النجم عبر المحيط الحرج. الأفق المطلق (المخطط الأيمن) هو الحد الفاصل بين الأحداث التي يمكنها إرسال إشارات إلى الكون البعيد (على سبيل المثال، الأحداث P و S التي ترسل إشارات على طول الأشعة الضوئية pp' و ss')، والأحداث التي لا يمكنها إرسال إشارات إلى الكون البعيد، الكون (على سبيل المثال، Q و R). ينشأ الأفق المطلق في مركز النجم، في الحدث المسمى C ، قبل زمن طويل من انكماش سطح النجم عبر المحيط الحرج. الأفق المطلق هو مجرد نقطة عند إنشائه، لكنه بعد ذلك يتوسع بسلاسة، مثل بالون في أثناء النفخ، ويظهر من خلال سطح النجم على وجه التحديد عندما ينكمش السطح عبر المحيط الحرج (الدائرة المسماة E). ثم يتوقف عن التوسع، ويتزامن بعد ذلك مع الأفق الظاهري الذي نشأ فجأة.



استطاع هو كينج أن يرى، في صوره ومخططاته الذهنية المجمعة، أن مساحات الآفاق المطلقة (ولكن ليس بالضرورة الآفاق الظاهرية) ستزداد ليس فقط عندما تصطدم الثقوب السوداء وتتجمع، ولكن أيضًا عند ولادتها، عندما تسقط المادة أو موجات الجاذبية، داخلها، عندما تؤدي جاذبية الأجسام الأخرى في الكون إلى زيادة المد والجزر عليها، وعندما تستخرج الطاقة الدورانية من دوامة الفضاء خارج آفاقها مباشرة. في الواقع، ستزداد مساحات الآفاق المطلقة دائمًا تقريبًا، ولا يمكن أن تتناقص أبدًا. السبب الفيزيائي بسيط: كل ما يواجهه الثقب يرسل الطاقة إلى الداخل عبر أفقه المطلق، ولا توجد طريقة يمكن أن تعود بها أي طاقة إلى الخارج. وبما أن جميع أشكال الطاقة تنتج الجاذبية، فهذا يعني أن جاذبية الثقب تتعزز باستمرار، وبالتالي فإن مساحة سطحه تنمو باستمرار.

كان استنتاج هو كينج، بشكل أكثر دقة، كما يلي: في أي منطقة من المكان، وفي أي لحظة من الزمن (إذا قيس في الإطار المرجعي لأي شخص)، قس مساحات جميع الآفاق المطلقة لجميع الثقوب السوداء وجمع المناطق معًا للحصول على مساحة إجمالية. ثم انتظر مهما طالت المدة التي ترغب فيها، وقس مرة أخرى مساحات جميع الآفاق المطلقة وأضفها. إذا لم تتحرك أي ثقوب سوداء عبر «جدران» منطقتك من المكان بين القياسات، لا يمكن أن تكون مساحة الأفق الإجمالية قد انخفضت، وستزداد دائمًا تقريبًا، على الأقل قليلًا.

كان هو كينج يدرك جيدًا أن اختيار تعريف الأفق، سواء كان مطلقًا أو ظاهريًا، لا يمكن أن يؤثر بأي شكل على أي تنبؤات لنتائج التجارب التي قد يقوم بها البشر أو الكائنات

الأخرى؛ على سبيل المثال، لا يمكنها التأثير على التنبؤات الخاصة بالأشكال الموجية لإشعاع الجاذبية الناتج عن تصادمات الثقوب الأسود (الفصل العاشر)، ولا يمكنها التأثير على التنبؤات الخاصة بكمية الأشعة السينية المنبعثة من الغاز الساخن الذي يسقط داخل أفق الثقب الأسود وعبره (الفصل الثامن). ومع ذلك، فإن اختيار التعريف يمكن أن يؤثر بقوة على السهولة التي يستنتج بها الفيزيائيون النظريون، من معادلات النسبية العامة لأينشتاين، خصائص الثقوب السوداء وسلوكياتها. سيصبح التعريف المختار أداة مركزية في النموذج الذي يوجّه به المنظرون أبحاثهم؛ من شأنه أن يؤثر على صورههم العقلية، ومخططاتهم، والكلمات التي يقولونها عند التواصل مع بعضهم، وقفزات بصيرتهم البديهية. ولهذا الغرض، اعتقد هوكينج أن الأفق المطلق الجديد، بمساحته المتزايدة بسلاسة، سيكون متفوقاً على الأفق الظاهري القديم، بقفزاته المتقطعة في الحجم.

لم يكن ستيفن هوكينج أول فيزيائي يفكر في الآفاق المطلقة ويكتشف زيادة مساحتها. كان روجر بنروز في أكسفورد قد فعل ذلك بالفعل، قبل ليلة أرق هوكينج في شهر نوفمبر. في الواقع، استندت رؤى هوكينج، إلى حد كبير، إلى الأسس التي وضعها بنروز (الفصل الثالث عشر) والمحادثة الأخيرة معه. ومع ذلك، لم يدرك بنروز قوة نظرية زيادة المساحة، وبالتالي لم يتقنها ولم ينشرها. لماذا غابت عنه قوتها؟ لأنه لم يكون أي صورة ذهنية واضحة عن موقع الأفق المطلق. لقد فاته ما رآه هوكينج بوضوح في تلك الليلة الطويلة: بعد تصادم الثقوب السوداء، يجب أن يستقر أفقها المطلق المندمج قريباً في موقع هادئ يمكن حساب مساحة سطحه من المعادلات القياسية للثقوب السوداء الهادئة.

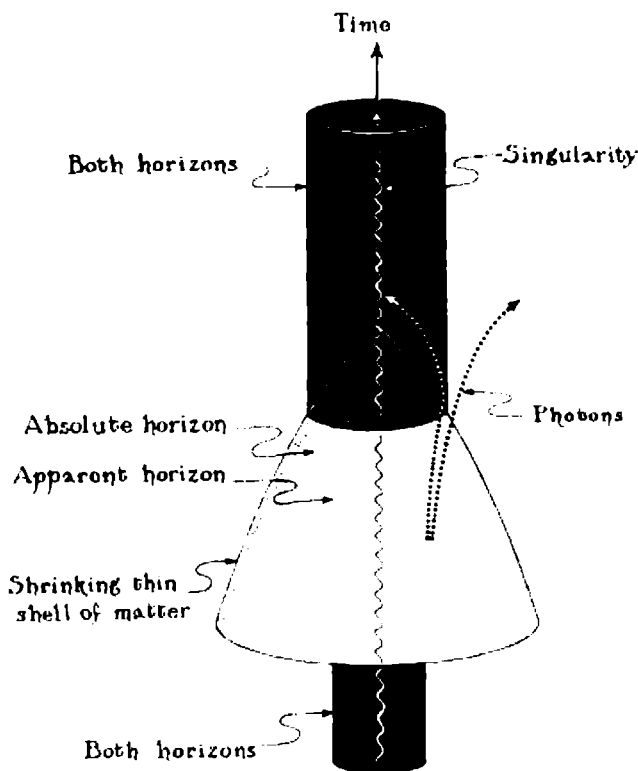
كما تمكن فيرنر إسرائيل، من جامعة ألبرتا بكندا، من إلقاء نظرة خاطفة على نظرية زيادة المساحة قبل هوكينج، ولكنه، بسبب فشله في إدراك أهميتها، تركها أيضاً من دون نشر. بالإضافة إلى ذلك، وعلى النقيض من هوكينج وبنروز، كان إسرائيل لا يزال يستخدم المفهوم القديم للأفق الظاهري، كما كانت حالنا جميعاً، نحن أصحاب النظريات النسبية، لقد كان تحت تأثير التنويم المغناطيسي. لقد لعب الأفق الظاهري دوراً مركزياً في اكتشاف بنروز المذهل عام 1964، وهو أن قوانين أينشتاين تجبر كل ثقب أسود على أن تكون له مفردة في مركزه (الفصل الثالث عشر). وبذلك أثبت الأفق الظاهري قوته. لقد أعمتنا هذه القوة، ولم نتمكن، نحن النسبيون، من تصور استبدال الأفق المطلق - كتعريف لسطح الثقب الأسود - بالأفق الظاهري.

كما أننا أولينا القليل من الاهتمام بالأفق المطلق لأنه ينتهك فكرتنا العزيزة بأن النتيجة لا ينبغي أن تسبق سببها. عندما تسقط المادة في الثقب الأسود، يبدأ الأفق المطلق في النمو («النتيجة») قبل أن تصل المادة إليه («السبب»). وينمو الأفق تحسباً لابتلاع المادة لاحقاً، مما سيؤدي إلى زيادة قوة جاذبية الثقب (الإطار 12.2). هذه المفارقة الظاهرة لها أصل بسيط. يعتمد تعريف الأفق المطلق على ما سيحدث في المستقبل: على ما إذا كانت الإشارات ستهرب في النهاية إلى الكون البعيد أم لا. وهو في مصطلحات الفلاسفة تعريف غائي (تعريف يعتمد على «الأسباب الغائية/النهائية»)، وهو يفرض على تطور الأفق أن يكون غائياً. وبما أن وجهات النظر الغائية نادرًا ما كانت مفيدة في الفيزياء الحديثة، فإن الأفق المطلق لا يستحق الاستكشاف.

12.2 الإطار

تطور الأفق الظاهري والمطلق للثقب التراكمي

يوضح مخطط الزمكان أدناه التطور المتشجج للأفق الظاهري والتطور الغائي للأفق المطلق. في لحظة أولية من الزمن (على شريحة أفقية بالقرب من أسفل الرسم البياني)، يُحاط ثقب أسود قديم غير دوار بقشرة كروية رقيقة من المادة. القشرة تشبه مطاط البالون، والثقب يشبه الثقب في مركز البالون. تسحب جاذبية الثقب القشرة (مطاط البالون)، مما يجبرها على الانكماش وفي النهاية يتلعها الثقب (الحفرة). يقفز الأفق الظاهري (الموقع الخارجي الذي فيه تسحب أشعة الضوء الصادرة -الموضحة بالنقاط- إلى الداخل) إلى الخارج فجأة، وبشكل متقطع، في اللحظة التي تصل فيها القشرة المنكمشة إلى موقع المحيط الحرج النهائي للثقب. يبدأ الأفق المطلق (الحد الفاصل بين الأحداث التي يمكنها أو لا يمكنها إرسال أشعة ضوئية صادرة إلى الكون البعيد) في التوسع قبل أن يتلع الثقب القشرة. فهو يتوسع تحسباً للبلع، وبعد ذلك، تمامًا كما يتلع الثقب، فإنه يستقر في نفس موقع الأفق الظاهري الذي يقفز فجأة.



هو كينج مفكر جريء، وهو أكثر استعدادًا بكثير من معظم الفيزيائيين للانطلاق في اتجاهات جذرية جديدة، إذا كانت تلك الاتجاهات «رائعة». كانت رائحة الأفق المطلق مناسبة له، لذلك على الرغم من طبيعته الراديكالية، فقد احتضنه، وقد أتى احتضانه بشماره. وفي غضون أشهر قليلة، تمكن هو كينج وجيمس هارتل من استخلاص، من قوانين النسبية العامة لأينشتاين، مجموعة من المعادلات الأنيقة التي تصف كيف يتوسع الأفق المطلق بشكل مستمر وسلس ويتغير شكله، تحسبًا لابتلاع الحطام المتساقط أو موجات الجاذبية، أو تحسبًا للانجذاب بفعل جاذبية الأجسام الأخرى.

في نوفمبر 1970، كان ستيفن هو كينج قد بدأ للتو في تحقيق خطواته الكاملة كعالم فيزياء. لقد حقق العديد من الاكتشافات المهمة بالفعل، لكنه لم يكن شخصية مهيمنة بعد. وبينما نمضي قدمًا في هذا الفصل، سنشاهده وهو يصبح هو المهيمن.

كيف تمكن هو كينج، بإعاقته الشديدة، من التفوق في التفكير والحدس على زملائه

المنافسين الرئيسيين، أشخاص مثل روجر بنروز، وفيرنر إسرائيل، وياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيتش (كما سنرى)؟ لقد استخدموا أيديهم. يمكنهم رسم صور وإجراء حسابات متعددة الصفحات على الورق، وهي حسابات يسجل فيها المرء العديد من النتائج الوسيطة المعقدة على طول الطريق، ثم يعود ويلتقطها واحدة تلو الأخرى ويجمعها للحصول على النتيجة النهائية؛ حسابات لا أتخيل أن يقوم بها أحد في رأسه. بحلول أوائل السبعينيات، كانت يدا هوكينج مشلولتين إلى حد كبير. لم يستطع رسم الصور أو كتابة المعادلات. كان يجب أن يكمل بحثه بالكامل في رأسه.

ولأن فقدان السيطرة على يديه كان تدريجيًا وببطء، كان لدى هوكينج متسع من الوقت للتكيف. لقد درَّب عقله تدريجيًا على التفكير بطريقة مختلفة عن عقول علماء الفيزياء الآخرين: فهو يفكر بأنواع جديدة من الصور الذهنية البديهية والمعادلات العقلية التي حَلَّتْ، بالنسبة إليه، محل رسومات الورق والقلم والمعادلات المكتوبة. لقد تبين أن الصور الذهنية والمعادلات الذهنية التي رسمها هوكينج أقوى، في بعض أنواع المشكلات، من الصور القديمة المكتوبة بالورقة والقلم، وأقل قوة في البعض الآخر، وقد تعلم تدريجيًا التركيز على المشكلات التي تعطي أساليبه الجديدة قوة أكبر، قوة لا يمكن لأي شخص آخر أن يبدأ بمضاهاتها.

لقد ساعدته إعاقته بطرق أخرى. وكما علق هو نفسه في كثير من الأحيان، فقد حرره ذلك من مسؤولية إلقاء المحاضرات لطلاب الجامعة، وبالتالي أصبح لديه وقت فراغ للبحث أكثر بكثير من زملائه الأكثر صحة. والأهم من ذلك، ربما، أدى مرضه في بعض النواحي إلى تحسين موقفه تجاه الحياة.



ستيفن هو كينج مع زوجته جين وابنهما تيموثي في كامبريدج، إنجلترا، عام 1980.
[تصوير كيب ثورن].

أصيب هو كينج بمرض التصلب الجانبي الضموري في عام 1963، بعد وقت قصير من بدء دراساته العليا في جامعة كامبريدج. التصلب الجانبي الضموري (ALS) هو اسم شامل لمجموعة متنوعة من أمراض الخلايا العصبية الحركية، ومعظمها يقتل بسرعة كبيرة. معتقدًا أنه لن يعيش سوى بضع سنوات، فقد هو كينج في البداية حماسه للحياة والفيزياء. ومع ذلك، بحلول شتاء 1964-1965، أصبح من الواضح أنه كان نوعًا نادرًا من مرض التصلب الجانبي الضموري، وهو نوع يستنزف سيطرة الجهاز العصبي المركزي على العضلات على مدار سنوات عديدة، وليس بضع سنوات فقط. فجأة بدت الحياة رائعة. لقد عاد إلى الفيزياء بقوة وحماس أكبر مما كان عليه في أي وقت مضى عندما كان طالبًا جامعيًا يتمتع بصحة جيدة. ومع عقده الجديد مع الحياة، تزوج جين وإيلد، التي التقى بها بعد وقت قصير من إصابته بمرض التصلب الجانبي الضموري والتي وقع في حبها خلال المراحل الأولى من مرضه.

كان زواج ستيفن بجين ضروريًا لنجاحه وسعادته في الستينيات والسبعينيات وحتى الثمانينيات. لقد صنع لهما منزلًا عاديًا وحياة طبيعية وسط الشدائد الجسدية.

كانت أسعد ابتسامة رأيتها في حياتي هي ابتسامة ستيفن في أمسية أغسطس عام 1972 في جبال الألب الفرنسية عندما عدت أنا وجين وأكبر أطفال هوكينج، روبرت ولوسي، من رحلة ليوم واحد إلى الجبال. ومن خلال الحماسة فقدنا مصعد التزلج الأخير أسفل الجبل، واضطررنا إلى النزول نحو 1000 متر سيرًا على الأقدام. ستيفن، الذي كان قلقًا بشأن تأخرنا، انفجر في ابتسامة هائلة، وتدفقت الدموع من عينيه عندما رأى جين وروبرت ولوسي يدخلون غرفة الطعام حيث كان يتناول وجبته المسائية، غير قادر على تناول الطعام.

فقد هوكينج القدرة على استخدام أطرافه ومن ثم صوته بشكل تدريجي بطيء. في يونيو 1965، عندما التقينا لأول مرة، كان يمشي باستخدام عصا وكان صوته مهترًا قليلًا. بحلول عام 1970، كان يحتاج إلى جهاز مشي بأربع أرجل. بحلول عام 1972، كان مقيدًا بكرسي متحرك مزود بمحرك وفقد القدرة على الكتابة إلى حد كبير، لكنه لا يزال قادرًا على إطعام نفسه ببعض السهولة، ولا يزال معظم الناطقين باللغة الإنجليزية قادرين على فهم كلامه، وإن كان بصعوبة. بحلول عام 1975، لم يعد قادرًا على إطعام نفسه، ولم يتمكن من فهمه سوى الأشخاص المعتادين على حديثه. بحلول عام 1981، كنت أواجه صعوبة شديدة في فهمه إلا إذا كنا في غرفة هادئة تمامًا؛ فقط الأشخاص الذين كانوا معه كثيرًا يمكنهم أن يفهموه بسهولة. بحلول عام 1985، لم تعد رثاء خاليتين من السوائل من تلقاء نفسها، وكان لا بد من إجراء عملية ثقب القصبة الهوائية حتى يمكن تنظيفهما بانتظام عن طريق الشفط. وكان الثمن باهظًا: لقد فقد صوته تمامًا. وللتعويض عن ذلك، حصل على مُرَكَّب صوتي يعمل بالحاسوب ولكنه أمريكية، وكان يعتذر عنه بخجل. وهو يتحكم في الحاسوب عن طريق مفتاح بسيط يمسكه بيد واحدة، ويضغط عليه في أثناء تمرير قائمة من الكلمات على شاشة الحاسوب. يلتقط كلمة تلو الأخرى من قائمة التمرير باستخدام مفتاحه، ويبني جملة. إنها عملية بطيئة إلى حد مؤلم، ولكنها فعالة؛ لا يمكنه إنتاج أكثر من جملة قصيرة واحدة في الدقيقة، ولكن جملة تُنطَق بوضوح بواسطة جهاز مزج الترددات، وغالبًا ما تكون جملة مثل اللآلئ.

ومع تدهور صوته، تعلم هوكينج أن يجعل كل جملة ذات أهمية. لقد وجد طرقًا للتعبير عن أفكاره بشكل أكثر وضوحًا وإيجازًا من الطرق التي استخدمها في السنوات الأولى من مرضه. ومع الوضوح وإيجاز التعبير، تحسن وضوح الفكر، وأصبح التأثير أكبر على

زملاته - ولكن أيضًا الميل إلى الظهور بمظهر المتنبي: عندما يصدر تصريحًا بشأن بعض الأسئلة العميقة، لا يمكننا، نحن زملاؤه، أحيانًا أن نكون متأكدين، إلا بعد مرور الكثير من الوقت من الفكر والحساب من جانبنا، سواء كان مجرد تخمين أو لديه أدلة قوية. في بعض الأحيان لا يخبرنا بذلك، ونسأل أحيانًا عما إذا كان، برؤاه الفريدة تمامًا، يتلاعب بنا. فهو، على أي حال، لا يزال يحتفظ بمسحة من الخبث الذي جعله يتمتع بشعبية في أيام دراسته الجامعية في أكسفورد، وبروح الدعابة التي نادرًا ما تتخلى عنه، حتى في أوقات المحنة. (قبل سنوات من ثقب القصة الهوائية، عندما بدأت أجد صعوبة في فهم كلامه، وجدت نفسي أقول مرارًا وتكرارًا، ما يصل إلى عشر مرات، «ستيفن، ما زلت لا أفهم؛ من فضلك قل ذلك مرة أخرى». من الإحباط، كان يستمر في تكرار كلامه حتى أفهم فجأة: كان يحكي لي نكتة مضحكة بشكل رائع، خارجة عن المألوف، من سطر واحد. وعندما أدركتها أخيرًا، كان يبتسم بسرور).

Entropy

القصور الحراري / الإنتروپيا

بعد أن أثبتت على قدرة هوكينج على التفوق في التفكير والتفوق على جميع زملائه المنافسين، يجب أن أعترف الآن بأنه لم يتمكن من القيام بذلك طوال الوقت، بل في معظم الأوقات فقط. ومن بين هزائمه، ربما كانت أكثر هزائمه إثارة على يد أحد طلاب الدراسات العليا لجون ويلر، وهو جاكوب بيكنشتاين. ولكن في خضم تلك الهزيمة، كما سترى، حقق هوكينج انتصارًا أعظم بكثير: اكتشافه أن الثقوب السوداء يمكن أن تتبخر. وسوف يشغل الطريق المتعرج لهذا الاكتشاف معظم ما تبقى من هذا الفصل.

كانت ساحة اللعب التي هُزم فيها هوكينج هي ساحة الديناميكا الحرارية للثقب الأسود. الديناميكا الحرارية هي مجموعة القوانين الفيزيائية التي تحكم السلوك الإحصائي العشوائي لأعداد كبيرة من الذرات، على سبيل المثال، الذرات التي تشكّل الهواء في الغرفة أو تلك التي تشكّل الشمس بأكملها. يتضمن السلوك الإحصائي للذرات - من بين أمور أخرى - اهتزازها العشوائي الناتج عن الحرارة؛ وبالمقابل، تشمل قوانين الديناميكا الحرارية - من بين أمور أخرى - القوانين التي تحكم الحرارة. ومن هنا جاء اسم الديناميكا الحرارية.

قبل عام من اكتشاف هوكينج لنظرية المساحة، لاحظ ديمتريوس كريستودولو، وهو طالب دراسات عليا يبلغ من العمر تسعة عشر عامًا في مجموعة ويلر برينستون، أن المعادلات التي تصف التغيرات البطيئة في خصائص الثقوب السوداء (على سبيل المثال، عندما تتراكم الغازات ببطء) تشبه بعض معادلات الديناميكا الحرارية. كان التشابه ملحوظًا، لكن لم يكن هناك سبب للاعتقاد بأنه أكثر من مجرد صدفة.

لقد عزز هذا التشابه نظرية مساحة هوكينج: تشبه نظرية المساحة إلى حد كبير القانون الثاني للديناميكا الحرارية. في الواقع، تصبح نظرية المساحة، كما عبر عنها سابقًا في هذا الفصل، القانون الثاني للديناميكا الحرارية إذا استبدلنا بعبار «مناطق الأفق» كلمة إنتروبيا: في أي منطقة من المكان، وفي أي لحظة من الزمن (كما قيست في الإطار المرجعي لأي شخص)، قس الإنتروبيا الإجمالية لكل شيء هناك. ثم انتظر مهما طال الزمن، ثم قس الإنتروبيا الكلية مرة أخرى. إذا لم يتحرك أي شيء عبر «جدران» منطقتك من الفضاء بين القياسات، لا يمكن أن يكون إجمالي الإنتروبيا قد انخفض، وسيزداد دائمًا تقريبًا، على الأقل قليلًا.

ما هذا الشيء الذي يسمى «الإنتروبيا» الذي يزداد؟ إنه مقدار «العشوائية» في المنطقة المختارة من الفضاء، وزيادة الإنتروبيا تعني أن الأشياء تصبح باستمرار عشوائية أكثر فأكثر.

وبتعبير أكثر دقة (انظر الإطار 3.12)، فإن الإنتروبيا هي لوغاريتم عدد الطرق التي يمكن بها توزيع جميع الذرات والجزيئات في المنطقة التي اخترناها، من دون تغيير المظهر العياني لتلك المنطقة³. عندما يكون هناك العديد من الطرق للذرات والجزيئات التي يمكن أن تتوزع من خلالها، فإن هناك كمية هائلة من العشوائية المجهرية وتصبح الإنتروبيا ضخمة.

قانون زيادة الإنتروبيا (القانون الثاني للديناميكا الحرارية) له قوة كبيرة. على سبيل المثال، لنفترض أن لدينا غرفة تحتوي على الهواء وبعض الصحف المجمعة. يحتوي الهواء والورق معًا على إنتروبيا أقل مما لو حرق الورق في الهواء لتكوين ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء وقليل من الرماد. بمعنى آخر، عندما تحتوي الغرفة على الهواء والورق الأصليين، تكون هناك طرق أقل لتوزيع جزيئاتها عشوائيًا مقارنةً بها عندما تحتوي

على الهواء النهائي وثاني أكسيد الكربون ويخار الماء والرماد. ولهذا السبب يحترق الورق بشكل طبيعي وبسهولة إذا أشعلته شرارة، ولماذا لا يمكن عكس الاحتراق بسهولة وطبيعية لتكوين ورق من ثاني أكسيد الكربون والماء والرماد والهواء. تزداد الإنتروبيا في أثناء الاحتراق؛ ستنخفض الإنتروبيا في أثناء عدم الاحتراق؛ وبالتالي يحدث الاحتراق ولا يحدث عدم الاحتراق.

لاحظ ستيفن هوكينج على الفور، في نوفمبر 1970، التشابه الملحوظ بين القانون الثاني للديناميكا الحرارية وقانون زيادة المساحة، ولكن كان واضحًا له أن التشابه مجرد صدفة. يعتقد هوكينج أنه يجب على المرء أن يكون مجنونًا، أو على الأقل قليل الذكاء، لادعاء أن مساحة أفق الثقب هي إلى حد ما إنتروبيا الثقب. ففي النهاية، لا يوجد شيء عشوائي على الإطلاق فيما يتعلق بالثقب الأسود. الثقب الأسود هو عكس العشوائية تمامًا؛ إنه البساطة المتجسدة. بمجرد أن يستقر الثقب الأسود في حالة سكون (من خلال انبعاث موجات الجاذبية؛ الشكل 7.4)، فإنه يُترك «بلا شعر» تمامًا: تحدد جميع خصائصه بدقة من خلال ثلاثة أرقام فقط، كتلته، وكمية حركته الزاوية، والشحنة الكهربائية. الثقب ليس به أي عشوائية على الإطلاق.

الإطار 12.3

القصور الحراري في غرفة ألعاب الطفل

تخيل غرفة ألعاب مربعة تحتوي على 20 لعبة. أرضية الغرفة مصنوعة من 100 بلاطة كبيرة (مع 10 بلاطات ممتدة على كل جانب)، ونظّف الأب الغرفة، ورمى جميع الألعاب على صف البلاط الموجود في أقصى الشمال. لم يهتم الأب مطلقًا بالألعاب التي سقطت على أي بلاط، لذلك خلطت جميعًا بشكل عشوائي. أحد مقاييس عشوائيتها هو عدد الطرق التي كان من الممكن أن تهبط بها على الأرض (والتي يعتبر الأب كل واحدة منها مُرضية بنفس القدر)؛ أي عدد الطرق التي يمكن من خلالها توزيع الألعاب العشرين على القطع العشر في الصف الشمالي. ويتبين أن هذا الرقم هو $10 \times 10 \times 10 \times \dots \times 10$ ، بعامل واحد قدره 10 لكل لعبة؛ أي 10^{20} .

هذا الرقم، 10^{20} ، هو أحد الأوصاف لمقدار العشوائية في الألعاب. ومع ذلك، فهو

وصف غير عملي إلى حد ما، حيث إن 10^{20} رقم كبير جداً. والأكثر سهولة في التعامل معه هو لوغاريتم 10^{20} ؛ أي عدد عوامل العدد 10 التي يجب ضربها معاً للحصول على 10^{20} . اللوغاريتم هو 20؛ وهذا اللوغاريتم لعدد الطرق التي يمكن بها نثر الألعاب على البلاط هو إنتروبيا الألعاب.

لنفترض الآن أن طفلاً يأتي إلى الغرفة ويلعب بالألعاب، ويرميها في كل مكان، ثم يغادر. يعود الأب ويرى الفوضى. توزع الآن الألعاب بشكل عشوائي أكثر من ذي قبل. لقد زادت الإنتروبيا الخاصة بها. لا يهتم الأب بمكان وجود كل لعبة فحسب؛ كل ما يهمه هو أنها متناثرة بشكل عشوائي في جميع أنحاء الغرفة. كم عدد الطرق المختلفة التي قد تكون متناثرة بها؟ بكم طريقة يمكن توزيع الألعاب العشرين على القطع المائة؟ $100 \times 100 \times 100 \times \dots \times 100$ ، بمعامل واحد 100 لكل لعبة؛ أي أن $100^{20} = 10^{40}$ طريقة. لوغاريتم هذا الرقم هو 40، لذلك قام الطفل بزيادة إنتروبيا الألعاب من 20 إلى 40.

قد تقول: «آها، ولكن بعد ذلك يُنظف الأب الغرفة وبالتالي يقلل من إنتروبيا الألعاب إلى 20». «ألا ينتهك هذا القانون الثاني للديناميكا الحرارية؟». لا، على الإطلاق. قد تقل إنتروبيا الألعاب عن طريق تنظيف الأب، لكن الإنتروبيا في جسد الأب وفي هواء الغرفة زادت: لقد استغرق الأمر الكثير من الطاقة لرمي الألعاب مرة أخرى على البلاط في أقصى الشمال، وهي الطاقة التي حصل عليها الأب «بحرق» بعض من الدهون في جسمه. أدى الحرق إلى تحويل جزيئات الدهون المنظمة بدقة إلى نفايات غير منظمة، على سبيل المثال، ثاني أكسيد الكربون الذي أطلقه بشكل عشوائي في الغرفة؛ والزيادة الناتجة في إنتروبيا الأب والغرفة (الزيادة في عدد الطرق التي يمكن بها توزيع ذراتها وجزيئاتها) أكثر بكثير من تعويض النقص في إنتروبيا الألعاب.

لم يقتنع جاكوب بيكنشتاين. بدا له من المرجح أن مساحة الثقب الأسود، بمعنى عميق، هي إنتروبيا الثقب الأسود، أو بشكل أكثر دقة، الإنتروبيا الخاصة به مضروبة في ثابت ما. إذا لم يكن الأمر كذلك، فكر بيكنشتاين، إذا كانت الثقوب السوداء لديها إنتروبيا متلاشية (لا توجد عشوائية على الإطلاق) كما ادعى هوكينج، يمكن استخدام الثقوب السوداء لتقليل إنتروبيا الكون وبالتالي انتهاك القانون الثاني للديناميكا الحرارية. كل ما يحتاج إليه المرء هو تجميع كل جزيئات الهواء من غرفة ما في حزمة صغيرة وإسقاطها في

ثقب أسود. ستختفي جزيئات الهواء وكل الإنتروبيا التي تحملها من كوننا عندما تدخل الحزمة إلى الثقب، وإذا لم تزايد إنتروبيا الثقب لتعويض هذه الخسارة، فإن الإنتروبيا الإجمالية للكون ستخفّض. وقال بيكنشتاين إن هذا الانتهاك للقانون الثاني للديناميكا الحرارية سيكون غير مُرضٍ إلى حد كبير. للحفاظ على القانون الثاني، يجب أن يمتلك الثقب الأسود إنتروبيا ترتفع عندما تسقط الحزمة عبر أفقه، ويبدو أن المرشح الواعد لتلك الإنتروبيا، كما بدا لبيكنشتاين، هو مساحة سطح الثقب.

أجاب هوكينج: لا، على الإطلاق. يمكنك أن تفقد جزيئات الهواء عن طريق رميها في ثقب أسود، كما يمكنك أيضًا أن تفقد الإنتروبيا. هذه مجرد طبيعة الثقوب السوداء. علينا فقط أن نقبل هذا الانتهاك للقانون الثاني للديناميكا الحرارية، كما قال هوكينج؛ فخصائص الثقوب السوداء تتطلب ذلك، علاوة على أنه ليس له أي عواقب خطيرة على الإطلاق. على سبيل المثال، على الرغم من أن انتهاك القانون الثاني للديناميكا الحرارية في الظروف العادية قد يسمح للمرء بصنع آلة ذات حركة أبدية، فإنه عندما يكون الثقب الأسود هو الذي يسبب الانتهاك، فمن غير الممكن وجود آلة ذات حركة أبدية. إن الانتهاك هو مجرد خصوصية صغيرة في قوانين الفيزياء، والتي من المفترض أن القوانين تتعايش معها بسعادة تامة.

لم يكن بيكنشتاين مقتنعًا.

اصطف جميع خبراء الثقوب السوداء في العالم إلى جانب هوكينج، باستثناء معلم بيكنشتاين، جون ويلر. قال ويلر لبيكنشتاين: «إن فكرتك مجنونة بدرجة كافية لدرجة أنها قد تكون صحيحة». وبهذا التشجيع، تقدم بيكنشتاين للأمام وشدد على تخمينه. وقد قدّر مقدار نمو إنتروبيا الثقب، عند سقوط حزمة من الهواء فيه، للحفاظ على القانون الثاني للديناميكا الحرارية، وقدّر مقدار الزيادة التي ستؤدي إليها الحزمة الغارقة في زيادة مساحة الأفق؛ ومن هذه التقديرات التقريبية، استنتج علاقة بين الإنتروبيا والمساحة التي سيزيد بها الأفق والتي اعتقد أنها قد تحافظ دائمًا على القانون الثاني للديناميكا الحرارية: وخلص إلى أن الإنتروبيا هي تقريبًا مساحة الأفق مقسومة على منطقة مشهورة (غير المفهومة حتى الآن) مرتبطة بقوانين الجاذبية الكمومية، مساحة بلانك-ويلر، 2.61×10^{-66} سنتيمتر مربع⁴. (ستتعرف على أهمية منطقة بلانك-ويلر في الفصلين التاليين). فإن هذه الإنتروبيا ستكون مساحة الثقب، 11000 كيلومتر مربع، مقسومة على مساحة بلانك ويلر،

2.61×10^{-66} سنتيمتر مربع؛ أي ما يعادل 10^{79} تقريبًا.

هذه كمية هائلة من الإنتروپيا. إنها تمثل قدرًا كبيرًا من العشوائية. أين تكمن هذه العشوائية؟ داخل الثقب، خمن بيكشتاين. يجب أن يحتوي باطن الثقب على عدد هائل من الذرات أو الجزيئات أو شيء من هذا القبيل، كلها موزعة عشوائيًا، ويجب أن يكون مجموع طرق توزيعها $10^{10^{79}}$.⁵

هراء، أجاب معظم علماء فيزياء الثقوب السوداء البارزين، بما فيهم أنا وهو كينج. ويحتوي باطن الثقب على مفردة، وليس على ذرات أو جزيئات.

ومع ذلك، فإن التشابه بين قوانين الديناميكا الحرارية وخصائص الثقوب السوداء كان مثيرًا للإعجاب.

في أغسطس 1972، مع اقتراب العصر الذهبي لأبحاث الثقوب السوداء إلى ذروته، اجتمع أبرز خبراء الثقوب السوداء في العالم ونحو خمسين طالبًا في جبال الألب الفرنسية لمدة شهر مكثف من المحاضرات والأبحاث المشتركة. كان الموقع هو نفس مدرسة ليه هوشز الصيفية، على نفس التلال الخضراء المقابلة لجبل مونت بلانك، حيث كنت قد تعلمت فيها قبل تسع سنوات (1963) تعقيدات النسبية العامة (الفصل العاشر). في عام 1963 كنت طالبًا. الآن، في عام 1972، كان من المفترض أن أصبح خبيرًا. في الصباح، كنا «الخبراء» نلقي محاضرات لبعضنا وللطلاب حول الاكتشافات التي حققناها خلال السنوات الخمس الماضية، وحول كفافنا الحالي نحو رؤى جديدة. خلال معظم فترات ما بعد الظهر، واصلنا صراعاتنا الحالية: أنا وإيجور نوفيكوف انعزلنا في كوخ خشبي صغير وكافحنا لاكتشاف القوانين التي تحكم الغاز في أثناء تراكمه في الثقوب السوداء وإصدار الأشعة السينية (الفصل الثامن)، في حين كنا نجلس على الأرائك في الغرفة. في صالة المدرسة، سعى طلابي بيل بريس وسول تيوكولسكي إلى إيجاد طرق لاكتشاف ما إذا كان الثقب الأسود الدوار مستقرًا في مواجهة الاضطرابات الصغيرة (الفصل السابع)، وعلى ارتفاع خمسين مترًا فوقني على جانب التل، تعاون جيمس باردين وبراندون كارتر وستيفن هوكنج في المحاولة؛ أن نستنتج من معادلات النسبية العامة لأينشتاين المجموعة الكاملة للقوانين التي تحكم تطور الثقوب السوداء. كان الإعداد مثاليًا، والفيزياء لذيذة.

بحلول نهاية الشهر، كان باردين وكارتر وهوكنج قد عززوا رؤاهم في مجموعة من

قوانين ميكانيكا الثقب الأسود التي تحمل تشابهاً مذهلاً مع قوانين الديناميكا الحرارية. في الواقع، تبين أن كل قانون من قوانين الثقب الأسود مطابق لقانون الديناميكا الحرارية، فقط إذا استبدلنا بعبارة «مساحة الأفق» كلمة «الإنتروبيا»، وبعبارة «جاذبية سطح الأفق» عبارة «درجة الحرارة». (الجاذبية السطحية، بشكل تقريبي، هي قوة سحب الجاذبية التي يشعر بها شخص ما في حالة سكون فوق الأفق مباشرة).

عندما رأى بيكنشتاين (الذي كان واحداً من الخمسين طالباً في المدرسة) هذا التوافق التام بين مجموعتي القوانين، أصبح أكثر اقتناعاً من أي وقت مضى بأن منطقة الأفق هي إنتروبيا الثقب. على النقيض من ذلك، رأى باردين وكارتر وهوكينج والخبراء الآخرون في هذا التناسب دليلاً قاطعاً على أن منطقة الأفق لا يمكن أن تكون إنتروبيا الثقب المقنعة. إذا كان الأمر كذلك، فبالمثل، يجب أن تكون الجاذبية السطحية هي درجة حرارة الثقب المقنعة، ولن تكون درجة الحرارة هذه صفرًا. ومع ذلك، فإن قوانين الديناميكا الحرارية تنص على أن أي جسم درجة حرارته غير الصفر يجب أن يصدر إشعاعاً، على الأقل قليلاً (هذه هي الطريقة التي تعمل بها المشعات التي تعمل على تدفئة بعض المنازل)، وكان الجميع يعلم أن الثقوب السوداء لا يمكنها إصدار أي شيء. من الممكن أن يسقط الإشعاع في الثقب الأسود، لكن لا يمكن لأي شيء أن يخرج منه أبداً.

لو كان بيكنشتاين قد اتبع حدسه إلى نهايته المنطقية، لكان أكد أن الثقب الأسود يجب أن تكون له درجة حرارة محدودة ويجب أن يصدر إشعاعات، وسوف ننظر إليه اليوم باعتباره نبياً مذهلاً. لكن بيكنشتاين تردد. واعترف بأنه كان من الواضح أن الثقب الأسود لا يمكن أن يشع، لكنه تشبث بقوة بإيمانه بإنتروبيا الثقب الأسود.

إشعاع الثقوب السوداء

أول إشارة إلى أن الثقوب السوداء يمكن أن تشع، جاءت من ياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيتش، في يونيو 1971، قبل أربعة عشر شهراً من مدرسة ليه هوشز الصيفية. ومع ذلك، لم يكن أحد يعيره أي اهتمام، ولهذا السبب أتحمل وطأة العار لأنني كنت صديقاً مقرباً لزيلدوفيتش وأحببته في حين كان يتلمس طريقه نحو رؤية جديدة جذرية.

كان زيلدوفيتش قد أحضرني إلى موسكو لقضاء مهمتي الثانية التي استمرت لعدة

أسابيع كعضو في مجموعته البحثية. في مهمني الأولى، قبل عامين، استولى من أجلي -في خضم أزمة الإسكان في موسكو- على شقة خاصة واسعة في شارع شابلوفكا، بالقرب من ميدان أكتوبر. بينما كان بعض أصدقائي الروس يتقاسمون شققاً مكونة من غرفة واحدة مع أزواجهم وأطفالهم ومجموعة من الآباء -غرفة واحدة، وليس غرفة نوم واحدة- فقد حصلت لنفسي على شقة بها غرفة نوم وغرفة معيشة ومطبخ وتلفزيون وطقم من الصيني الأبيض. وفي هذه الفترة الثانية عشت بشكل أكثر تواضعاً، في غرفة منفردة في فندق مملوك للأكاديمية السوفيتية للعلوم، على مقربة من شقتي القديمة.

في السادسة والنصف من صباح أحد الأيام، استيقظت من نومي بسبب مكالمات هاتفية من زيلدوفيش. «تعالَ إلى شقتي، كيب! لديّ فكرة جديدة حول اللف المحوري للشقوب السوداء!». مع العلم أن القهوة والشاي والبروجكي (المعجنات التي تحتوي على لحم البقر المفروم أو السمك أو الملفوف أو المربي أو البيض) ستكون في انتظاري، سكبت الماء البارد على وجهي، وارتديت ملابس، وأمسكت بحقيبتني، ونزلت خمس مجموعات من السلالم إلى الشارع، أمسكت بعربة مزدحمة، ثم انتقلت إلى حافلة ترولي، ونزلت في شارع فوروييفسكوي رقم 2 ب في تلال لينين، على بُعد 10 كيلومترات جنوب الكرملين. رقم 4، المجاور، كان مقر إقامة أليكسي كوسيجين، رئيس وزراء اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية.

مشيت عبر بوابة مفتوحة في السياج الحديدي الذي يبلغ ارتفاعه ثمانية أقدام ودخلت إلى ساحة غابات تبلغ مساحتها أربعة أفدنة تحيط بالمنزل السكني الضخم رقم ب2 والتوأم رقم أ2، مع طائهما الأصفر المتقشر. كمكافأة لإسهاماته في القوة النووية السوفيتية (الفصل السادس)، حصل زيلدوفيش على واحدة من شقق ب2 الثماني: الربع الجنوبي الغربي من الطابق الثاني. كانت الشقة هائلة بمعايير موسكو، بمساحة 1500 قدم مربع؛ شاركها مع زوجته فارارا بافلوفا وابنته وصهره.

استقبلني زيلدوفيش عند باب الشقة، بابتسامة دافئة على وجهه وأصوات عائلته الصاخبة تخرج من الغرف الخلفية. خلعت حذائي، وارتديت نعلًا من الكومة بجانب الباب، وتبعته إلى غرفة المعيشة/الطعام المتهالكة ولكن المريحة، بأريكتها وكراسيها المحشوة. على أحد الجدران كانت هناك خريطة للعالم، مع دبائيس ملونة تحدد جميع الأماكن التي دُعي زيلدوفيش إليها (لندن، برينستون، بكين، بومباي، طوكيو، وغيرها

الكثير)، والتي منعتها الدولة السوفيتية، في جنون العظمة التي تعيشها، خوفاً من فقدان الأسرار النووية، من زيارتها.

أجلسني زيلدوفيش، وعيناه تتراقصان، إلى طاولة الطعام الطويلة التي تسيطر على وسط الغرفة، وأعلن: «لا بد أن الثقب الأسود الدوار يشع. سوف يرتد الإشعاع المغادر إلى الثقب ويبطئ دورانه تدريجياً، ثم يوقفه. ومع انتهاء الدوران، سيتوقف الإشعاع، وسيعيش الثقب إلى الأبد بعد ذلك في حالة كروية تماماً وغير دوارة».

أكدت: «هذا أحد أكثر الأشياء جنوناً التي سمعتها على الإطلاق». (المواجهة المفتوحة ليست أسلوبي، لكن زيلدوفيش نجح فيها. لقد أَرادها، وتوقعها، وقد أحضرني إلى موسكو جزئياً لأكون شريكاً في السجال، وخصماً لاختبار الأفكار). «كيف يمكنك تقديم مثل هذا الادعاء المجنون؟»، تساءلت، «يعلم الجميع أن الإشعاع يمكن أن يتدفق إلى الثقب، لكن لا شيء، ولا حتى الإشعاع، يمكن أن يخرج منه».

وأوضح زيلدوفيش منطقته قائلاً: «إن الكرة المعدنية التي تدور حول نفسها تبعث إشعاعات كهرومغناطيسية، وبالتالي، بالمثل، فإن الثقب الأسود الذي يدور يجب أن يصدر موجات جاذبية».

هذا دليل نموذجي لزيلدوفيش، فكرت في نفسي. حدس فيزيائي خالص، لا يعتمد أكثر على المقاربة. لا يفهم زيلدوفيش النسبية العامة جيداً بما يكفي لحساب ما يجب أن يفعله الثقب الأسود، لذا بدلاً من ذلك يحسب سلوك كرة معدنية تدور، ثم يؤكد أن الثقب الأسود سيتصرف بشكل مماثل، وأيقظني في الساعة السادسة والنصف صباحاً لاختبار ادعائه.

ومع ذلك، فقد رأيت بالفعل أن زيلدوفيش يقوم باكتشافات لا تستند إلى أسس أكبر من هذا؛ على سبيل المثال، ادعاؤه عام 1965 أنه عندما ينفجر نجم جبلي، فإنه ينتج ثقباً أسود كروياً تماماً (الفصل السابع)، وهو ادعاء تبين أنه صحيح وينبئ بعدم وجود شعر للثقوب. وهكذا تقدمت بحذر. «لم يكن لدي أي فكرة عن أن كرة معدنية تدور سينبعث منها إشعاع كهرومغناطيسي. كيف؟».

وأوضح زيلدوفيش: «الإشعاع ضعيف للغاية، لدرجة أن أحداً لم يرصده من قبل، ولم يتنبأ به من قبل. ومع ذلك، يجب أن يحدث. سوف تشع الكرة المعدنية عندما تدغدغها

تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي. وبالمثل، فإن الثقب الأسود سوف يشع عندما تكشط تقلبات فراغ الجاذبية أفقه».

لقد كنت غيبًا جدًا في عام 1971 لدرجة أنني لم أدرك الأهمية العميقة لهذه الملاحظة، ولكن بعد عدة سنوات أصبح الأمر واضحًا. استندت جميع الدراسات النظرية السابقة للثقوب السوداء إلى قوانين النسبية العامة لأينشتاين، وكانت تلك الدراسات واضحة لا جدال فيها: الثقب الأسود لا يمكن أن يشع. ومع ذلك، نحن المنظرون، نعلم أن النسبية العامة ليست سوى تقريب لقوانين الجاذبية الحقيقية، وهو تقريب يجب أن يكون ممتازًا عند التعامل مع الثقوب السوداء، كما اعتقدنا، ولكنه تقريبي على الرغم من ذلك⁷. كنا على يقين من أن القوانين الحقيقية يجب أن تكون الميكانيكا الكمومية، لذلك أطلقنا عليها قوانين الجاذبية الكمومية. على الرغم من أن قوانين الجاذبية الكمومية لم تكن مفهومة إلا بشكل غامض في أحسن الأحوال، فقد استنتج جون ويلر في الخمسينيات من القرن الماضي أنها لا بد أن تنطوي على تقلبات فراغ الجاذبية، وتقلبات صغيرة لا يمكن التنبؤ بها في انحناء الزمكان، وتقلبات تبقى حتى عندما يكون الزمكان خاليًا تمامًا من كل المادة. ويحاول المرء إزالة جميع موجات الجاذبية منه؛ أي عندما يكون فراغًا مثاليًا (الإطار 12.4). كان زيلدوفيش يدعي أنه توقع، من خلال تشبيهه الكهرومغناطيسي، أن تقلبات فراغ الجاذبية هذه ستسبب في إشعاع الثقوب السوداء الدوارة. «ولكن كيف؟» سألت في حيرة.

وثب زيلدوفيش على قدميه، وسار بخطى واسعة نحو سبورة مساحتها متر مربع على الحائط المقابل لخريطته، وبدأ يرسم مخططاً ويتحدث في نفس الوقت. أظهر رسمه (الشكل 12.1) موجة تتدفق نحو جسم يدور، وتتحرك حول سطحه لفترة من الوقت، ثم تتدفق بعيدًا. وأوضح زيلدوفيش أن الموجة قد تكون كهرومغناطيسية والجسم الدوار كرة معدنية، أو قد تكون موجة جاذبية والجسم ثقبًا أسود.

الإطار 12.4

تقلبات الفراغ

تقلبات الفراغ، بالنسبة إلى الموجات الكهرومغناطيسية والجاذبية، هي «حركات الانتكاس الخائقة» للإلكترونات.

تذكر (الفصل الرابع) أنه إذا حصرَ شخص ما إلكترونًا في منطقة صغيرة من المكان، فبصرف النظر عن مدى صعوبة محاولة إبطائه حتى التوقف، فإن قوانين الميكانيكا الكمومية تجبر الإلكترون على مواصلة التحرك بشكل عشوائي، وبشكل غير متوقع. هذه هي حركة الانتكاس الخائقة التي تنتج الضغط الذي تدعم به النجوم القزمة البيضاء نفسها ضد ضغط جاذبيتها.

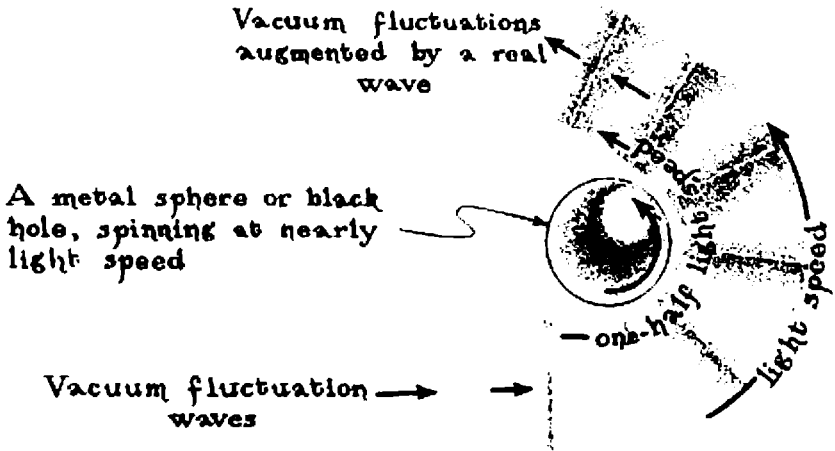
وبالمثل، إذا حاول المرء إزالة جميع التذبذبات الكهرومغناطيسية أو الجاذبية من منطقة ما في الفضاء، فلن ينجح أبدًا. تصر قوانين الميكانيكا الكمومية على أن نظل هناك دائمًا بعض التذبذبات العشوائية التي لا يمكن التنبؤ بها؛ أي بعض الموجات الكهرومغناطيسية والجاذبية العشوائية التي لا يمكن التنبؤ بها. هذه هي تقلبات الفراغ التي (وفقًا لزيلدوفيش) سوف «تدغدغ» كرة معدنية دوارة أو ثقب أسود وتتسبب في إشعاعها.

لا يمكن إيقاف تقلبات الفراغ هذه بإزالة طاقتها، لأنها لا تحتوي في المتوسط على أي طاقة على الإطلاق. في بعض المواقع وفي بعض اللحظات تكون لديها طاقة إيجابية «تستعيرها» من مواقع أخرى، ونتيجة لذلك فإن تلك المواقع الأخرى لديها طاقة سلبية. وكما لن تسمح البنوك للعملاء بالحفاظ على أرصدة البنوك السلبية لفترة طويلة، فإن قوانين الفيزياء تجبر مناطق الطاقة السلبية على امتصاص الطاقة بسرعة من جيرانها ذوي الطاقة الإيجابية، وبالتالي استعادة نفسها إلى الرصيد الصفري أو الموجب. وهذا الاقتراض المستمر والعشوائي للطاقة وعودتها هو ما يحرك تقلبات الفراغ.

مثلما تصبح حركات انتكاس الإلكترون أكثر قوة عندما يحصر المرء الإلكترون في منطقة أصغر فأصغر (الفصل الرابع)، كذلك تكون تقلبات الفراغ للموجات الكهرومغناطيسية والجاذبية أكثر قوة في المناطق الصغيرة منها عن المناطق الكبيرة؛ أي أكثر قوة للأطوال الموجية الصغيرة مقارنة بالأطوال الموجية الكبيرة. وهذا، كما سنرى في الفصل الثالث عشر، له عواقب عميقة على طبيعة المفردات الموجودة في مراكز الثقوب السوداء.

إن تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي مفهومة جيداً وهي سمة شائعة في الفيزياء اليومية. على سبيل المثال، فإنها تلعب دوراً رئيسياً في تشغيل أنبوب ضوء الفلورسنت. يثير التفريغ الكهربائي ذرات بخار الزئبق في الأنبوب، ثم تدغغ تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي العشوائية كل ذرة مثارة، مما يجعلها، في وقت عشوائي، تبعث بعضاً من طاقة الإثارة الخاصة بها على شكل موجة كهرومغناطيسية (فوتون) (*). هذا الانبعاث هو ما يُطلق عليه اسم عفوي، لأنه عندما حُدد لأول مرة على أنه تأثير فيزيائي، لم يدرك الفيزيائيون أنه ينجم عن تقلبات الفراغ. وكمثال آخر، داخل الليزر، تتداخل تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي العشوائية مع ضوء الليزر المتماسك (التداخل بالمعنى الوارد في الإطار 10.3)، وبالتالي تعديل ضوء الليزر بطرق لا يمكن التنبؤ بها. يؤدي هذا إلى خروج الفوتونات الخارجة من الليزر في أوقات عشوائية وغير متوقعة، بدلاً من خروجها بشكل موحد واحدة تلو الأخرى - وهي ظاهرة تسمى شوشرة الفوتون.

على النقيض من تقلبات فراغ الجاذبية، لم تشاهد كهرومغناطيسياً تجريبياً بعد. من المفترض أن تكون تكنولوجيا التسعينيات، بجهود كبير، قادرة على اكتشاف موجات الجاذبية عالية الطاقة الناتجة عن اصطدام الثقوب السوداء (الفصل العاشر)، ولكن ليس تقلبات الفراغ الأضعف بكثير لهذه الموجات.



12.1 آلية زيلدوفيش التي من خلالها تتسبب تقلبات الفراغ في إشعاع جسم دوار.

(*) يمتص هذا الفوتون «الأولي» بواسطة طبقة فوسفورية على جدران الأنبوب، والتي بدورها تنبعث منها فوتونات «ثانوية» نراها كضوء.

وأوضح زيلدوفيش أن الموجة القادمة ليست موجة «حقيقية»، بل هي بالأحرى تقلبات فراغية. عندما تكتسح هذه الموجة المتقلبة الجسم الدوار، فإنها تتصرف مثل صف من المتزلجين على الجليد يدورون: يجب على المتزلجين الخارجيين أن يتحركوا بسرعة عالية في حين يتحرك المتزلجون الداخليون ببطء أكبر بكثير؛ وبالمثل، فإن الأجزاء الخارجية للموجة تتحرك بسرعة عالية جدًا، وهي سرعة الضوء، في حين تتحرك أجزاؤها الداخلية بشكل أبطأ بكثير من الضوء، وفي الواقع، أبطأ من دوران سطح الجسم 8. وأكد زيلدوفيش أن الجسم الذي يدور بسرعة سوف يمسك بالموجة المتقلبة فيسرعها، تمامًا مثل صبي صغير يسرع المقلاع وهو يتأرجح به بشكل يتسارع تدريجيًا. يغذي التسارع بعضًا من طاقة دوران الجسم في الموجة، مما يؤدي إلى تضخيمها. الجزء الحديد المضخم من الموجة هو «موجة حقيقية» ذات طاقة إجمالية موجبة، في حين يظل الجزء الأصلي غير المضخم عبارة عن تقلبات فراغية مع إجمالي طاقة صفر (الإطار 12.4). وهكذا استخدم الجسم المغزلي تقلبات الفراغ كنوع من المحفز لإنشاء موجة حقيقية، وكقالب لشكل الموجة الحقيقية. وأشار زيلدوفيش إلى أن هذا مشابه للطريقة التي تسبب بها تقلبات الفراغ في إطلاق الجزيء المهتز للضوء «تلقائيًا» (الإطار 12.4).

أخبرني زيلدوفيش أنه أثبت أن الكرة المعدنية التي تدور تشع بهذه الطريقة؛ واستند برهانه إلى قوانين الديناميكا الكهربائية الكمومية، وهي القوانين المعروفة التي تنشأ من زواج الميكانيكا الكمومية مع قوانين ماكسويل للكهرومغناطيسية. وعلى الرغم من أنه لم يكن لديه دليل مماثل على أن الثقب الأسود الدوار سوف يشع، فإنه كان متأكدًا تمامًا من خلال المقاربة أنه يجب أن يشع. في الواقع، أكد أن الثقب الدوار لن يشع موجات الجاذبية فحسب، بل أيضًا الموجات الكهرومغناطيسية (الفوتونات)، والنيوترينوات، وجميع أشكال الإشعاع الأخرى التي يمكن أن توجد في الطبيعة.

لقد كنت متأكدًا تمامًا من أن زيلدوفيش مخطئ. بعد عدة ساعات، ومع عدم وجود اتفاق في الأفق، عرض عليّ زيلدوفيش الرهان. في روايات إرنست همنجواي، قرأ زيلدوفيش عن سكوتش وايت هورس، وهو نوع أنيق ومقصود على فئة معينة من الويسكي. إذا أظهرت الحسابات التفصيلية مع قوانين الفيزياء أن ثقبًا أسود دوارًا يشع، فسأحضر لزيلدوفيش زجاجة من سكوتش وايت هورس من أمريكا. إذا أظهرت الحسابات أنه لا يوجد مثل هذا الإشعاع، فإن زيلدوفيش سيعطيني زجاجة من الكونياك الجورجي الفاخر.

لقد قبلت الرهان، لكنني كنت أعلم أنه لن يُسوّى بسرعة. ولتسوية هذه المشكلة، فإن الأمر يتطلب فهمًا للزواج بين النسبية العامة والميكانيكا الكمومية بشكل أعمق بكثير مما فعله أي شخص آخر في عام 1971.

وبعد أن راهنت، سرعان ما نسيت. ذاكرتي رديئة، وكان بحثي يتركز في مكان آخر. لكن زيلدوفيش لم ينس؛ وبعد عدة أسابيع من الجدل معي، كتب حجته وقدمها للنشر. ربما كان الحكم سيرفض مخطوطته لو أنها جاءت من شخص آخر؛ كانت حجته חדسية للغاية بحيث لا يمكن قبولها. لكن سمعة زيلدوفيش هي التي انتصرت؛ نُشرت ورقته البحثية، ولم يُعَرَّها أحد أي اهتمام تقريبًا. لقد بدا إشعاع الثقب الأسود غير قابل للتصديق على الإطلاق.

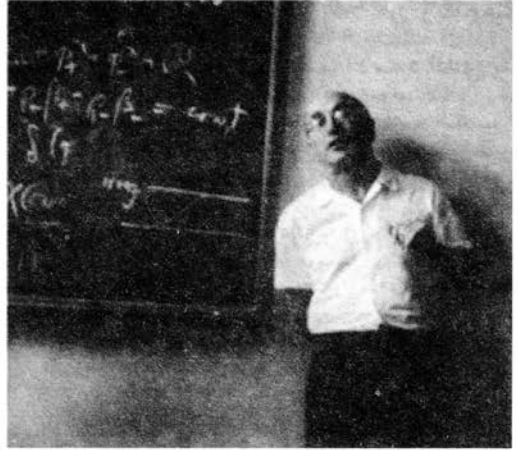
وبعد مرور عام، في ليه هوشز، في المدرسة الصيفية، كنا نحن «الخبراء» لا نزال نتجاهل فكرة زيلدوفيش. ولا أذكر أنه ذُكرولو مرة واحدة 10.

في سبتمبر 1973، عدت إلى موسكو مرة أخرى، هذه المرة برفقة ستيفن هوكينج وزوجته جين. كانت هذه أول رحلة لستيفن إلى موسكو منذ أيام دراسته. كان هو وجين وزيلدوفيش (مضيفنا السوفييتي)، غير مرتاحين بشأن كيفية التعامل مع احتياجات ستيفن الخاصة في موسكو، واعتقدوا أنه من الأفضل أن أكون رفيقهم، نظرًا لكوني على دراية بموسكو وصديقًا مقربًا لستيفن وجين، و مترجمًا لمحادثات الفيزياء، ومرشدًا.

أقمنا في فندق روسيا، قبالة الساحة الحمراء بالقرب من الكرملين. وعلى الرغم من أننا كنا نخرج كل يوم تقريبًا لإلقاء محاضرات في معهد أو آخر، أو لزيارة متحف أو دار الأوبرا أو الباليه، فإن تفاعلاتنا مع الفيزيائيين السوفييت كانت تحدث في أغلب الأحيان في جزء من جناح فندق هوكينج المكون من غرفتين، مع إطلالة على كاتدرائية القديس باسيل. واحدًا تلو الآخر، جاء كبار علماء الفيزياء النظرية في الاتحاد السوفييتي إلى الفندق لتكريم هوكينج والتحدث معه.

من بين الفيزيائيين الذين قاموا برحلات متكررة إلى غرفة فندق هوكينج كان زيلدوفيش وطالب الدراسات العليا أليكسي ستاروبينسكي. لقد وجد هوكينج أن زيلدوفيش وستاروبينسكي رائعان مثله. في إحدى زيارته، وصف ستاروبينسكي حدسية زيلدوفيش بأن الثقب الأسود الدوار يجب أن يشع، ووصف الزواج الجزئي بين الميكانيكا الكمومية

والنسبية العامة الذي طوره هو زيلدوفيش (استنادًا إلى عمل رائد سابق قام به بريس ديويت وليونارد باركر وآخرون)، ثم وصفوا برهائنًا، باستخدام هذا الزواج الجزئي، على أن الثقب الدوار يشع بالفعل. كان زيلدوفيش في طريقه نحو الفوز برهانه معي.



على اليسار: ستيفن هوكينج يستمع إلى محاضرة في مدرسة ليه هوشز الصيفية في صيف عام 1972. على اليمين: ياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيش على السبورة في شقته في موسكو في صيف عام 1971. [صور لكيب ثورن].

من بين كل الأشياء التي تعلمها هوكينج من محادثاته في موسكو، كان هذا أكثر ما أثار اهتمامه. ومع ذلك، كان متشككًا في الطريقة التي جمع بها زيلدوفيش وستاروبينسكي بين قوانين النسبية العامة وقوانين الميكانيكا الكمومية، لذلك بعد عودته إلى كامبريدج، بدأ في تطوير اقتراحه الجزئي بين الميكانيكا الكمومية والنسبية العامة. واستخدمه لاختبار ادعاء زيلدوفيش بأن الثقوب الدوارة يجب أن تشع.

في هذه الأثناء، كان العديد من الفيزيائيين الآخرين في أمريكا يفعلون الشيء نفسه، ومن بينهم ويليام أونروه (أحد طلاب ويلر حديثًا) ودون بابيج (أحد طلابي). وبحلول أوائل عام 1974، أكد أونروه وبابيج، كل منهما بطريقة الخاصة، توقع زيلدوفيش: يجب أن يصدر الثقب الدوار إشعاعًا حتى يستنفد كل طاقة دورانه ويتوقف انبعائه. يجب أن أتنازل عن رهاني.

الثقوب السوداء تنكمش وتنضجر

ثم جاءت القنبلة. أعلن ستيفن هوكينج، أولاً في مؤتمر في إنجلترا، ثم في مقال علمي موجز في مجلة نيتشر، عن توقع وقح، وهو توقع عارض كلاً من زيلدوفيتش، وستاروبينسكي، وبايج، وأونرو. أكدت حسابات هوكينج أن الثقب الأسود الذي يدور يجب أن يشع ويبطئ دورانه. ومع ذلك، فقد توقع أيضاً أنه عندما يتوقف الثقب عن الدوران، فإن إشعاعه لا يتوقف. مع عدم وجود أي لف محوري باقٍ، ولا طاقة لف محوري متبقية، يستمر الثقب في إصدار إشعاعات من جميع الأنواع (الجاذبية والكهر ومغناطيسية والنيوترينو)، ومع استمرار إشعاعه، يستمر في فقدان الطاقة. في حين تخزن طاقة اللف المحوري في دوامة الفضاء خارج الأفق، فإن الطاقة التي يفقدها الثقب الآن يمكن أن تأتي من مكان واحد فقط: من داخل الثقب!

ومن المثير للدهشة أيضاً أن حسابات هوكينج تنبأت بأن طيف الإشعاع (أي كمية الطاقة المشعة عند كل طول موجي) يشبه تماماً طيف الإشعاع الحراري الصادر عن جسم ساخن. بمعنى آخر، يتصرف الثقب الأسود تماماً كما لو أن أفقه له درجة حرارة محدودة، وخلص هوكينج إلى أن درجة الحرارة هذه تتناسب مع جاذبية سطح الثقب. كان هذا (إذا كان هوكينج على حق) دليلاً لا يقبل الجدل على أن قوانين باردن وكارتر وهوكينج لميكانيكا الثقب الأسود هي قوانين الديناميكا الحرارية المقنّعة، وأن الثقب الأسود، كما ادعى بيكنشتاين قبل عامين، لديه إنتروبيا تتناسب مع مساحة سطحه.

قالت حسابات هوكينج أكثر من ذلك. بمجرد أن يتباطأ دوران الثقب، فإن إنتروبيا الثقب ومساحة أفقه تتناسبان مع مربع كتلته، في حين أن درجة حرارته وجاذبية سطحه تتناسبان مع كتلته مقسومة على مساحته، وهو ما يعني أنه يتناسب عكسياً مع كتلته. لذلك، مع استمرار الثقب في إطلاق الإشعاع، وتحويل الكتلة إلى طاقة متدفقة، تنخفض كتلته، وتنخفض الإنتروبيا الخاصة به ومساحته، وترتفع درجة حرارته وجاذبية سطحه. ينكمش الثقب ويصبح أكثر سخونة. في حقيقة الأمر، يتبخّر الثقب.

الثقب الذي تشكل مؤخراً عن طريق الانفجار الداخلي النجمي (وبالتالي كتلته أكبر من شمسين تقريباً) لديه درجة حرارة منخفضة جداً: أقل من $10^{-8} \times 3$ درجة فوق الصفر

المطلق (0.03 ميكروكلفن). لذلك، يكون التبخر في البداية بطيئاً جداً؛ بطيئاً جداً لدرجة أن الثقب سيتطلب وقتاً أطول من 10^{67} عام (10^{57} مرة قدر عمر الكون الحالي) لينكمش بشكل ملحوظ. ومع ذلك، عندما ينكمش الثقب فيسخن، فإنه سوف يشع بقوة أكبر وسيتسارع تبخره. أخيراً، عندما تنخفض كتلة الثقب إلى ما بين ألف طن و100 مليون طن (لسنا متأكدين إلى أين)، وينكمش أفق الثقب إلى جزء صغير من حجم نواة الذرة، سيكون الثقب ساخناً للغاية (تتراوح درجة حرارته بين تريليون و100 ألف تريليون درجة) بحيث ينفجر بعنف في جزء من الثانية.

كان العشرات من خبراء العالم في مجال التزاوج الجزئي بين النسبية العامة والنظرية الكمومية على يقين تام من أن هوكينج قد ارتكب خطأً. إن استنتاجه ينتهك كل ما كان معروفاً آنذاك عن الثقوب السوداء. وربما كان زواجه الجزئي المختلف عن زواج الآخرين خطأً؛ أو ربما كان زواجه صحيحاً، لكنه أخطأ في حساباته.

على مدى السنوات العديدة التالية، فحَصَ الخبراء نسخة هوكينج من الزواج الجزئي بدقة مقارنة بنسخهم الخاصة، وحسابات هوكينج للموجات الصادرة عن الثقوب السوداء وحساباتهم الخاصة. تدريجياً، اتفق الخبراء واحداً تلو الآخر مع هوكينج، وفي هذه العملية ثَبَّتُوا الزواج الجزئي، مما أدى إلى إنتاج مجموعة جديدة من القوانين الفيزيائية. تسمى القوانين الجديدة بقوانين المجالات الكمومية في الزمكان المنحني لأنها تأتي من زواج جزئي حيث لا يعتبر الثقب الأسود جسمًا خاضعًا للزمكان المنحني والميكانيكا الكمومية والنسبية العامة، في حين أن موجات الجاذبية والموجات الكهرومغناطيسية والأنواع الأخرى من الإشعاع يُنظر إليها على أنها مجالات كمومية، وبعبارة أخرى، موجات تخضع لقوانين الميكانيكا الكمومية، وبالتالي تنصرف أحياناً مثل الموجات وأحياناً مثل الجسيمات (انظر الإطار 4.1). [إن الزواج الكامل بين النسبية العامة والنظرية الكمومية؛ أي القوانين الصحيحة تماماً للجاذبية الكمومية، من شأنه أن يتعامل مع كل شيء، بما في ذلك الزمكان المنحني للثقب، باعتباره ميكانيكا كمومية؛ أي أنه يخضع لمبدأ عدم اليقين (الإطار 10.2)، وازدواجية الموجة/الجسيم (الإطار 4.1)، وتقلبات الفراغ (الإطار 12.4). وستتعرف على هذا الزواج الكامل وبعض آثاره في الفصل التالي].

كيف كان من الممكن التوصل إلى اتفاق حول القوانين الأساسية للمجالات الكمومية في الزمكان المنحني من دون أي تجارب لتوجيه اختيار القوانين؟ كيف يمكن للخبراء أن

يزعموا بشبه يقين أن هوكينج كان على حق من دون إجراء تجارب للتحقق من ادعاءاتهم؟ وجاء يقينهم تقريباً من اشتراط أن تكون قوانين المجالات الكمومية وقوانين الزمكان المنحني متشابهة بطريقة متسقة تماماً. (إذا لم تكن التشابكات متسقة تماماً، فإن قوانين الفيزياء، عند التعامل معها بطريقة ما، قد تقدم تنبؤاً واحداً، على سبيل المثال، أن الثقوب السوداء لا تشع أبداً، وعند التعامل معها بطريقة أخرى، قد تقدم تنبؤاً مختلفاً، على سبيل المثال (أن الثقوب السوداء يجب أن تشع دائماً. وبالتالي إخراج الفيزيائيين المساكين، الذين لا يعرفون ماذا يصدقون، من العمل).

يجب أن تكون القوانين المتشابهة الجديدة متسقة مع قوانين النسبية العامة للزمكان المنحني في غياب المجالات الكمومية، ومع قوانين المجالات الكمومية في غياب انحناء الزمكان. هذا بالإضافة إلى طلب الحصول على شبكة مثالية، مماثلة للمطالبة بأن تتشابه صفوف وأعمدة لعبة الكلمات المتقاطعة بشكل مثالي، مما أدى إلى تحديد شكل القوانين الجديدة بشكل كامل تقريباً. إذا كان من الممكن أن تتشابه القوانين بشكل متسق بأي شكل (وهذا أمر لا بد منه، إذا كان نهج الفيزيائيين في فهم الكون له أي معنى)، فمن الممكن أن تتشابه فقط بالطريقة الموصوفة في القوانين الجديدة المتفق عليها للمجالات الكمومية، في الزمكان المنحني.

غالباً ما يُستخدم شرط ترابط قوانين الفيزياء بشكل متسق كأداة في البحث عن قوانين جديدة. ومع ذلك، نادراً ما أظهرت متطلبات الاتساق هذه قوة كبيرة كما هي الحال هنا، في ساحة المجالات الكمومية في الزمكان المنحني. على سبيل المثال، عندما طور أينشتاين قوانين النسبية العامة (الفصل الثاني)، لم تستطع اعتبارات الاتساق أن تخبره بفرضيته الأولية، وهي أن الجاذبية ناتجة عن انحناء الزمكان؛ جاءت هذه الفرضية الأولية إلى حد كبير من حدس أينشتاين. ومع ذلك، مع وجود هذه الفرضية، فإن اشتراط أن تتوافق قوانين النسبية العامة الجديدة بشكل متسق مع قوانين نيوتن للجاذبية عند الجاذبية الضعيفة، ومع قوانين النسبية الخاصة عندما لا تكون هناك جاذبية على الإطلاق، هو الذي حدد أشكال القوانين الجديدة. بشكل فريد تقريباً؛ على سبيل المثال، كان المفتاح لاكتشاف أينشتاين لمعادلة المجال الخاصة به.

في سبتمبر 1975، عدت إلى موسكو في زيارتي الخامسة، حاملاً زجاجة سكوتش وايت هورس لزيلدوفيش. لدهشتي، اكتشفت أنه على الرغم من أن جميع الخبراء الغربيين

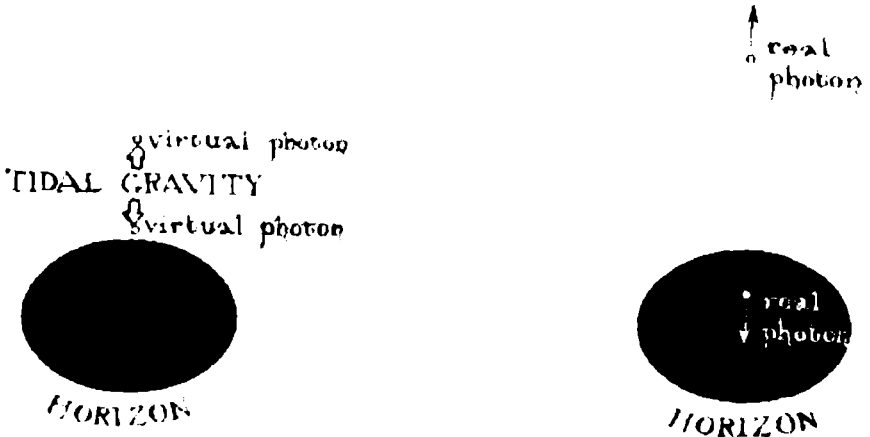
قد اتفقوا حتى الآن على أن هوكينج على حق وأن الثقوب السوداء يمكن أن تبخر، فإن أحدًا في موسكو لم يصدق حسابات هوكينج أو استنتاجاته. على الرغم من أن العديد من التأكيدات لادعاءات هوكينج، المستمدة من أساليب جديدة ومختلفة تمامًا، نُشرت خلال عامي 1974 و1975، فإن تلك التأكيدات لم يكن لها تأثير يذكر في الاتحاد السوفيتي. لماذا؟ لأن زيلدوفيش وستاروبينسكي، أعظم خبيرين سوفيتيين، كانا كافرين: فقد استمرا في تأكيد أن بعد فقدان الثقب الأسود المشع كل دورانه، فلا بد أن يتوقف عن الإشعاع، وبالتالي لا يمكنه أن يتبخر تمامًا. تجادلت مع زيلدوفيش وستاروبينسكي، ولكن من دون جدوى؛ لقد كانا يعرفان الكثير عن المجالات الكمومية في الزمكان المنحني أكثر مني، وعلى الرغم من أنني (كالعادة) كنت متأكدًا تمامًا من أن الحقيقة في جانبي، فإنني لم أتمكن من مواجهة حججهم.

كان من المقرر أن تكون رحلة العودة إلى أمريكا يوم الثلاثاء الموافق 23 سبتمبر. في مساء يوم الاثنين، بينما أحزم حقائبي في غرفتي الصغيرة في فندق الجامعة، رن جرس الهاتف. كان زيلدوفيش: «تعال إلى شقتي يا كيب! أريد أن أتحدث عن تبخر الثقب الأسود!». لضيق الوقت، طلبت سيارة أجرة أمام الفندق. لم يكن هناك أي شيء في الأفق، لذلك، وفقًا للطريقة المعتادة لسكان موسكو، أبلغت سائق سيارة عابرًا وعرضت عليه خمسة روبلات ليأخذني إلى رقم 2 ب في شارع فوروبيفسكوي. أومأ برأسه موافقًا وانطلقنا، في شوارع خلفية لم أسافر إليها من قبل. تلاشى خوفي من الضياع عندما تأرجحنا على طريق فوروبيفسكوي. مع «سباسيو» ممتن! نزلت أمام ب 2، وركضت عبر البوابة وأراضي الغابات، إلى داخل المبنى، ثم صعدت الدرج إلى الطابق الثاني، في الزاوية الجنوبية الغربية.

استقبلني زيلدوفيش وستاروبينسكي عند الباب، بابتسامة عريضة على وجهيهما وأيديهما فوق رأسيهما. «لقد استسلمنا؛ هوكينج على حق. نحن المخطئان!». في الساعة التالية، وصفا لي كيف أن نسختهم لقوانين المجالات الكمومية في الزمكان المنحني للثقب الأسود، رغم اختلافها ظاهريًا عن نسخة هوكينج، كانت متكافئة تمامًا. وقد استنتجا أن الثقوب السوداء لا يمكن أن تبخر بسبب خطأ في حساباتهما، وليس بسبب قوانين خاطئة. وبعد تصحيح الخطأ، وافقا الآن. تتطلب القوانين أن تبخر الثقوب السوداء، لا مفر من الإقرار بذلك.

هناك عدة طرق مختلفة لتصوير تبخر الثقب الأسود، تتوافق مع الطرق المختلفة لصياغة قوانين المجالات الكمومية في الزمكان المنحني للثقب الأسود. ومع ذلك، فإن جميع الطرق تعترف بأن تقلبات الفراغ هي المصدر النهائي للإشعاع المتدفق. ربما يكون أبسط وصف تصويري هو الوصف المعتمد على الجسيمات وليس الموجات:

تخضع تقلبات الفراغ، مثل موجات الطاقة الإيجابية «الحقيقية»، لقوانين ازدواجية الموجة/الجسيم (الإطار 4.1)؛ أي أن لها جوانب موجية وجوانب جسيمية. جوانب الموجة التي تعرفنا عليها بالفعل (الإطار 12.4): تتقلب الموجات بشكل عشوائي وغير متوقع، مع وجود طاقة إيجابية مؤقتاً هنا، وطاقة سلبية مؤقتاً هناك، وطاقة صفر في المتوسط. ويتجسد الجانب الجسيمي في مفهوم الجسيمات الافتراضية؛ أي الجسيمات التي تومض إلى الوجود في أزواج (جزيئين في المرة الواحدة)، وتعيش لحظياً على طاقة متقلبة مستعارة من مناطق مجاورة في الفضاء، ثم تفنى وتختفي، مما يعطي طاقتها إلى المناطق المجاورة. بالنسبة إلى تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي، فإن الجسيمات الافتراضية هي فوتونات افتراضية؛ بالنسبة إلى تقلبات فراغ الجاذبية، فهي جرافيتونات (جمع جرافيتون) افتراضية¹².



12.2 آلية تبخر الثقب الأسود كما يراها الشخص الساقط في الثقب. على اليسار: المد والجزر بفعل الجاذبية للثقب الأسود تسحب زوجاً من الفوتونات الافتراضية بعيداً عن بعضه، وبالتالي تغذي بالطاقة. على اليمين: اكتسبت الفوتونات الافتراضية طاقة كافية من المد والجزر بفعل الجاذبية لتتجسد بشكل دائم في فوتونات حقيقية، يهرب أحدها من الثقب بينما يسقط الآخر باتجاه مركز الثقب.

يوضح الشكل 12.2 الطريقة التي تتسبب بها تقلبات الفراغ في تبخر الثقوب السوداء. يظهر على اليسار زوج من الفوتونات الافتراضية بالقرب من أفق الثقب الأسود، كما يشاهدان شخص داخل إطار مرجعي يسقط في الثقب. يمكن للفوتونات الافتراضية أن تنفصل عن بعضها بسهولة، ما دام كلاهما بقي في منطقة يكتسب فيها المجال الكهرومغناطيسي طاقة موجبة مؤقتًا. يمكن أن يكون لهذه المنطقة أي حجم، صغيرة جدًا أو ضخمة، نظرًا لأن تقلبات الفراغ تحدث على جميع مقاييس الطول؛ ومع ذلك، فإن حجم المنطقة سيكون دائمًا تقريبًا نفس الطول الموجي لموجتها الكهرومغناطيسية المتقلبة، وبالتالي يمكن للفوتونات الافتراضية أن تتحرك بعيدًا بمقدار طول موجي واحد فقط. إذا كان الطول الموجي مساويًا لمحيط الثقب تقريبًا، يمكن للفوتونات الافتراضية أن تنفصل بسهولة عن بعضها بمقدار ربع المحيط، كما هو موضح في الشكل.

المد والجزر بفعل الجاذبية بالقرب من الأفق قويان جدًا؛ فهما يسحبان الفوتونات الافتراضية بقوة هائلة، وبالتالي يغذيانها بطاقة كبيرة. كما يراها الراصد الذي يسقط والذي يقع في منتصف الطريق بين الفوتونات. إن الزيادة في طاقة الفوتون كافية، بحلول الوقت الذي تفصل فيه الفوتونات بمقدار ربع محيط الأفق، لتحويلها إلى فوتونات حقيقية طويلة العمر (النصف الأيمن من الشكل 12.2)، وتكون لديها طاقة متبقية كافية لرد الطاقة مرة أخرى إلى مناطق الطاقة السلبية المجاورة في الفضاء. لقد تحررت الفوتونات، التي أصبحت الآن حقيقية، من بعضها. أحدها داخل الأفق وفُقد إلى الأبد من الكون الخارجي. أما الآخر فيهرب من الثقب، حاملًا معه الطاقة (أي الكتلة 13) التي منحها إياه المد والجزر بفعل جاذبية الثقب. وينكمش الثقب قليلًا، مع انخفاض كتلته.

ولا تعتمد آلية إشعاع الجسيمات هذه إطلاقًا على حقيقة أن الجسيمات كانت فوتونات، والموجات المرتبطة بها كانت كهرومغناطيسية. وستعمل هذه الآلية بشكل جيد بالتساوي مع جميع أشكال الجسيمات/الموجات الأخرى (أي جميع أنواع الإشعاع الأخرى - الجاذبية والنيوترينو وهلم جرا)، وبالتالي فإن الثقب الأسود يشع كل أنواع الإشعاع.

قبل أن تتجسد الجسيمات الافتراضية في جسيمات حقيقية، يجب أن تظل أقرب إلى بعضها من الطول الموجي لموجاتها تقريبًا. ومع ذلك، للحصول على طاقة كافية من المد والجزر بفعل جاذبية الثقب، يجب أن تبتعد عن بعضها بمقدار ربع محيط الثقب. وهذا يعني أن الأطوال الموجية للجسيم/الموجات التي يشعها الثقب ستكون نحو ربع محيط الثقب من حيث الحجم، وربما أكبر.

يبلغ محيط الثقب الأسود الذي تبلغ كتلته ضعف كتلة الشمس نحو 35 كيلومترًا، وبالتالي فإن الجسيمات/ الموجات التي يصدرها ستكون لها أطوال موجية تبلغ نحو 9 كيلومترات أو أكبر. وهي أطوال موجية هائلة مقارنة بالضوء أو موجات الراديو العادية، ولكنها لا تختلف كثيرًا عن أطوال موجات الجاذبية التي سيصدرها الثقب إذا اصطدم بثقب آخر.

خلال السنوات الأولى من حياته المهنية، حاول هوكينج أن يكون حذرًا وصارمًا للغاية في أبحاثه. لم يؤكد قط أن الأمور صحيحة ما لم يتمكن من تقديم دليل دامغ عليها تقريبًا. ومع ذلك، بحلول عام 1974، كان قد غيّر موقفه: قال لي بحزم: «أفضل أن أكون على حق بدلًا من أن أكون صارمًا». يتطلب تحقيق الدقة العالية الكثير من الوقت. بحلول عام 1974، كان هوكينج قد وضع لنفسه أهدافًا لفهم التزاوج الكامل بين النسبية العامة والميكانيكا الكمومية، وفهم أصل الكون، وهي الأهداف التي يتطلب تحقيقها قدرًا هائلًا من الوقت والتركيز. ربما شعر هوكينج بأنه محدود أكثر مما يشعر به الآخرون بسبب مرضه الذي يقصر حياته، فقد شعر أنه لا يستطيع تحمل تكاليف اكتشافاته لفترة كافية من أجل تحقيق دقة عالية، كما أنه لا يستطيع تحمل تكاليف استكشاف جميع السمات المهمة لاكتشافاته. يجب عليه المضي قدمًا بسرعة عالية.

وهكذا في عام 1974، قد أثبت هوكينج بشكل قاطع أن الثقب الأسود يشع كما لو أن درجة حرارته تتناسب مع جاذبية سطحه، واستمر، من دون دليل حقيقي، في تأكيد كل أوجه التشابه الأخرى بين قوانين ميكانيكا الثقب الأسود وقوانين الديناميكا الحرارية، والتي هي أكثر من مجرد صدفة: فقوانين الثقب الأسود هي نفس قوانين الديناميكا الحرارية، ولكنها مقنعة. من هذا التأكيد وعلاقته المؤكدة بين درجة الحرارة وجاذبية السطح، استنتج هوكينج علاقة دقيقة بين إنتروبيا الثقب ومساحة سطحه: الإنتروبيا هي $0.10857 \dots$ مرة قدر مساحة السطح 14، مقسومة على مساحة بلانك-ويلر. بمعنى آخر، فإن الثقب غير الدوار الذي تبلغ كتلته 10 مرات قدر كتلة الشمس له إنتروبيا تبلغ 4.6×10^{78} ، وهو ما يعادل تقريبًا حدسية بيكنشتاين.

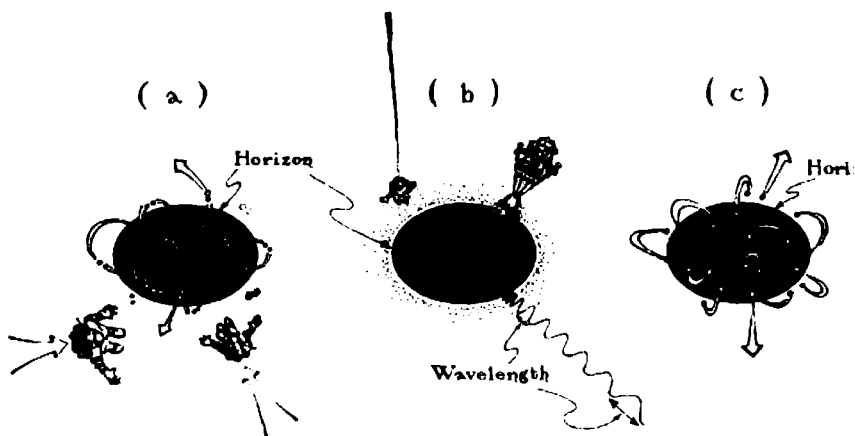
كان بيكنشتاين، بالطبع، متأكدًا من أن هوكينج على حق، وقد توهج بسرور. بحلول نهاية عام 1975، كنت أنا وزيلدوفيش وستاروينسكي وزملاء هوكينج الآخرون نميل بشدة إلى الموافقة. ومع ذلك، فإننا لن نشعر بالرضا التام حتى نفهم الطبيعة الدقيقة

للعشوائية الهائلة للثقب الأسود. لا بد أن تكون هناك $10^{78} \times 104.6$ طريقة لتوزيع شيء ما داخل الثقب الأسود، من دون تغيير مظهره الخارجي (كتلته، وكمية الحركة الزاوية، والشحنة)، ولكن ما ذلك الشيء؟ وكيف يمكن للمرء، بمصطلحات فيزيائية بسيطة، أن يفهم السلوك الحراري للثقب الأسود؛ أي حقيقة أن الثقب يتصرف تمامًا مثل جسم عادي له درجة حرارة؟ عندما انتقل هوكينج إلى البحث عن الجاذبية الكمومية وأصل الكون، ركز بول ديفيز، وبيل أونروه، وروبرت والد، وجيمس يورك، والعديد من زملائه الآخرين على هذه القضايا. تدريجيًا على مدى السنوات العشر التالية، وصلنا إلى الفهم الجديد المتجسد في الشكل 12.3.

ويصور الشكل 12.3 a تقلبات فراغ الثقب الأسود، كما يراها الراصدون وهم يسقطون نحو الداخل عبر الأفق. تتكون تقلبات الفراغ من أزواج من الجسيمات الافتراضية. في بعض الأحيان، يتمكن المد والجزر بفعل الجاذبية من إعطاء أحد الأزواج طاقة كافية حتى يصبح الجسيمان الافتراضيان حقيقيين، ولكي يهرب أحدهما من الثقب. كانت هذه هي وجهة النظر حول تقلبات الفراغ وتبخر الثقب الأسود التي ناقشناها في الشكل 12.2.

ويصور الشكل 12.3 b وجهة نظر مختلفة حول تقلبات فراغ الثقب، وجهة نظر الراصد الذين يقيمون فوق أفق الثقب مباشرة ويكونون في حالة سكون إلى الأبد بالنسبة إلى الأفق. ولمنع ابتلاع الثقب لذواتهم، يجب على هؤلاء المراقبين أن يتسارعوا بقوة، مقارنة بالمراقبين الذين يسقطون، باستخدام محرك صاروخي أو معلقين بحبل. ولهذا السبب، تسمى وجهة نظر هؤلاء المراقبين «وجهة النظر المتسارعة». وهي أيضًا وجهة نظر «نموذج الغشاء» (الفصل الحادي عشر).

والمثير للدهشة، من وجهة النظر المتسارعة، أن تقلبات الفراغ لا تتكون من جسيمات افتراضية تومض داخل وخارج التواجد، بل من جسيمات حقيقية ذات طاقات إيجابية وأعمار طويلة؛ انظر الإطار 5.12. تشكل الجسيمات الحقيقية جواً حاراً حول الثقب، يشبه إلى حد كبير الغلاف الجوي للشمس. وترتبط بهذه الجسيمات الحقيقية موجات حقيقية. حينما يتحرك الجسم للأعلى عبر الغلاف الجوي، تسحبه الجاذبية، مما يقلل من طاقة حركته؛ بالمقابل، عندما تتحرك الموجة للأعلى، فإنها تنزاح بفعل الجاذبية نحو الأحمر إلى أطوال موجية أطول وأطول (الشكل 12.3 b).



12.3 (a) يرى الراصدون الذين يسقطون في ثقب أسود (الرجلان الصغيران اللذان يرتديان بدلتين فضاء) أن تقلبات الفراغ بالقرب من أفق الثقب تتكون من أزواج من الجسيمات الافتراضية، (b) كما يراها الراصدون فوق الأفق مباشرة في حالة سكون بالنسبة إلى الأفق (الرجل الصغير المعلق بحبل والرجل الصغير الذي يشعل محركه الصاروخي)، تتكون تقلبات الفراغ من جو حار من الجسيمات الحقيقية؛ هذه هي «وجهة النظر المتسارعة». (ج) تبدو جزيئات الغلاف الجوي، من وجهة النظر المتسارعة، وكأنها تنبعث من أفق حار يشبه الغشاء. وهي تطير لأعلى لمسافات قصيرة، ثم تسحب معظمها مرة أخرى إلى الأفق. ومع ذلك، يتمكن عدد قليل من الجسيمات من الإفلات من قبضة الثقب والتبخر في الفضاء الخارجي.

الإطار 12.5

الإشعاع التراكمي

في عام 1975، اكتشف ويليام أونروه، طالب ويلر الأخير، وبشكل مستقل بول ديفيز في كلية كينجز بلندن، (باستخدام قوانين المجالات الكمومية في الزمكان المنحني) أن المراقبين المتسارعين فوق أفق الثقب الأسود يجب أن يروا تقلبات الفراغ هناك، وليس كأزواج افتراضية من الجسيمات بل كجو من الجسيمات الحقيقية، وهو الغلاف الجوي الذي أطلق عليه أونروه «إشعاع التسارع».

كشف هذا الاكتشاف المذهل أن مفهوم الجسيم الحقيقي نسبي وليس مطلقاً؛ أي أن ذلك يعتمد على الإطار المرجعي للفرد. الراصدون في الأطارات المتساقطة بحرية الذين يغوصون في أفق الثقب لا يرون أي جسيمات حقيقية خارج الأفق، بل فقط جسيمات

افتراضية. الراصدون في الإطارات المتسارعة، الذين يظلون دائماً فوق الأفق بسبب تسارعهم، يرون عددًا كبيرًا من الجسيمات الحقيقية.

كيف يكون هذا ممكنًا؟ كيف يمكن لأحد المراقبين أن يدعي أن الأفق محاط بغلاف جوي من الجسيمات الحقيقية والآخر لا يرى ذلك؟ تكمن الإجابة في حقيقة أن موجات التقلبات الفراغية للجسيمات الافتراضية لا تقتصر فقط على المنطقة الواقعة فوق الأفق؛ جزء من كل موجة من التقلبات الفراغية يكون داخل الأفق وجزء آخر منها (أي من الموجة) خارجه (خارج أفق الثقب).

• يستطيع الراصدون الساقطون سقوطًا حرًا، الذين يغوصون في الأفق، رؤية جزأين من موجة تقلبات الفراغ، الجزء الموجود داخل الأفق والجزء الخارجي. لذا فإن هؤلاء المراقبين يدركون جيدًا (من خلال قياساتهم) أن الموجة هي مجرد تقلبات في الفراغ، وبالتالي فإن جسيماتها افتراضية وليست حقيقية.

• الراصدون المتسارعون، الذين يبقون دائماً خارج الأفق، لا يمكنهم رؤية سوى الجزء الخارجي من موجة تقلبات الفراغ، وليس الجزء الداخلي؛ وبالتالي، فإنهم من خلال قياساتهم غير قادرين على تمييز أن الموجة هي مجرد قلب فراغي مصحوب بجسيمات افتراضية. نظرًا لأنهم لا يرون سوى جزء من موجة التقلبات، فإنهم يخطئون في اعتبارها «الشيء الحقيقي» -وهي موجة حقيقية مصحوبة بجسيمات حقيقية، ونتيجة لذلك تكشف قياساتهم في جميع أنحاء الأفق عن جو من الجسيمات الحقيقية.

إن حقيقة أن الجسيمات الحقيقية لهذا الغلاف الجوي يمكن أن تبخر تدريجيًا وتطير إلى الكون الخارجي (الشكل 12.3 c) هي إشارة إلى أن وجهة نظر الراصدين المتسارعين صحيحة تمامًا؛ أي صحيحة تمامًا مثل وجهة نظر الراصدين الذين يسقطون بحرية: ما يراه الراصدون المتساقطون بحرية على أنه أزواج افتراضية تتحول إلى جسيمات حقيقية بفعل المد الجاذبية وجزرها، يتبعها تبخر أحد الجسيمات الحقيقية، يراه الراصدون المتسارعون ببساطة على أنه تبخر أحد الجسيمات التي كانت دائماً حقيقية وتسكن دائماً الغلاف الجوي للثقب الأسود. كلتا وجهتي النظر صحيحة؛ إنهما نفس الوضع الفيزيائي، ويمكن رؤيتهما من خلال إطارين مرجعيين مختلفين.

يوضح الشكل 12.3 c حركة عدد قليل من الجسيمات في الغلاف الجوي للثقب الأسود، من وجهة النظر المتسارعة. يبدو أن الجسيمات تنبعث من الأفق. يطير معظمها لأعلى لمسافة قصيرة ثم تسحبها الجاذبية القوية للثقب مرة أخرى إلى الأفق، لكن القليل منها يتمكن من الإفلات من قبضة الثقب. الجسيمات الهاربة هي نفس الجسيمات التي يرى المراقبون أنها تتجسد من أزواج افتراضية (الشكل 12.3 a). إنها جسيمات هوكينج المتبخرة.

من وجهة النظر المتسارعة، يتصرف الأفق كسطح يشبه غشاء ذا درجة حرارة عالية؛ إنه غشاء «نموذج الغشاء» الموصوف في الفصل الحادي عشر. تمامًا كما يبعث سطح الشمس الساخن جسيمات (على سبيل المثال، الفوتونات التي تنتج ضوء النهار على الأرض)، فإن غشاء الأفق الساخن يبعث جسيمات: الجسيمات التي تشكل الغلاف الجوي للثقب، والقليل منها الذي يتبخر. يؤدي الانزياح الأحمر بفعل الجاذبية إلى تقليل طاقة الجسيمات في أثناء طيرانها لأعلى من الغشاء، لذلك على الرغم من أن الغشاء نفسه ساخن للغاية، فإن الإشعاع المتبخر يكون أكثر برودة بكثير.

وجهة النظر المتسارعة لا تفسر فقط الشعور بأن الثقب الأسود ساخن، بل تفسر أيضًا العشوائية الهائلة للثقب. تشرح التجربة الفكرية التالية كيفية حدوث ذلك (وهي التجربة التي اخترعتها أنا وباحث ما بعد الدكتوراه، فويتشيك زوريك).

ألق كمية صغيرة من المادة تحتوي على كمية صغيرة من الطاقة في الغلاف الجوي للثقب الأسود (أو ما يعادلها من الكتلة)، وكمية الحركة الزاوية (اللف المحوري)، والشحنة الكهربائية. ومن الغلاف الجوي، ستستمر هذه المادة في النزول عبر الأفق إلى داخل الثقب. بمجرد دخول المادة إلى الثقب، يستحيل معرفة طبيعة المادة المحقونة من خلال فحص الثقب من الخارج (سواء كانت مكونة من مادة أم من مادة مضادة، من فوتونات وذرات ثقيلة، أم من إلكترونات وبوزيترونات)، ومن المستحيل معرفة مكان حقن المادة بالضبط. نظرًا لأن الثقب الأسود ليس له «شعر»، فكل ما يمكن اكتشافه، من خلال فحص الثقب من الخارج، هو إجمالي كميات الكتلة، وكمية الحركة الزاوية، والشحنة التي دخلت الغلاف الجوي.

اسأل عن عدد الطرق التي يمكن بها حقن هذه الكميات من الكتلة وكمية الحركة

الزاوية والشحنة في الغلاف الجوي الحار للثقب. يشبه هذا السؤال التساؤل عن عدد الطرق التي يمكن بها توزيع ألعاب الطفل على البلاط في غرفة اللعب في الإطار 12.3، وبالمقابل، فإن لوغاريتم عدد طرق الحقن يجب أن يكون هو الزيادة في إنتروبيا الغلاف الجوي، كما وصفتها القوانين القياسية للديناميكا الحرارية. من خلال عملية حسابية بسيطة إلى حد ما، تمكنت أنا وزوريك من إثبات أن هذه الزيادة في إنتروبيا الديناميكية الحرارية تساوي بالضبط ضعف الزيادة في مساحة الأفق، مقسومة على مساحة بلانك-ويلر؛ أي أنها بالضبط الزيادة المستترة في مساحة الأفق، وهو نفس الاستتار/ التكرار الذي استدل عليه هوكينج، عام 1974، من التشابه الرياضي بين قوانين ميكانيكا الثقب الأسود وقوانين الديناميكا الحرارية.

يمكن التعبير عن نتيجة هذه التجربة الفكرية بإيجاز على النحو التالي: إنتروبيا الثقب الأسود هي لوغاريتم عدد الطرق التي يمكن أن يتكون بها الثقب. وهذا يعني أن هناك $10^{78} \times 10^{4.6}$ طريقة مختلفة لتكوين ثقب أسود كتلته 10 كتل شمسية وأنتروبيا تبلغ $10^{78} \times 4.6$. هذا التفسير للإنتروبيا خمته في الأصل بيكنشتاين في عام 1972، وقدم هوكينج وتلميذه السابق جيونز دليلاً تجريدياً للغاية عليه في عام 1977.

تُظهر التجربة الفكرية أيضًا القانون الثاني للديناميكا الحرارية في أثناء عمله. إن الطاقة وكمية الحركة الزاوية والشحنة التي يلقيها المرء في الغلاف الجوي للثقب يمكن أن يكون لها أي شكل بالإطلاق؛ ما يعني أنه قد تكون الغرفة المملوءة بالهواء ملفوفة في كيس، والتي التقينا بها سابقاً في هذا الفصل في أثناء حيرتنا حول القانون الثاني. عند إلقاء الكيس في الغلاف الجوي للثقب، تقل إنتروبيا الكون الخارجي بمقدار الإنتروبيا (العشوائية) الموجودة في الكيس. ومع ذلك، فإن إنتروبيا الغلاف الجوي للثقب، ومن ثم الثقب، ترتفع بأكثر من إنتروبيا الكيس، وبالتالي فإن الإنتروبيا الإجمالية للثقب بالإضافة إلى الكون الخارجي ترتفع. هنا تخضع للقانون الثاني للديناميكا الحرارية.

وبالمثل، فقد اتضح أنه عندما ييخر الثقب الأسود بعض الجسيمات، تنخفض مساحة سطحه والإنتروبيا، لكن الجسيمات تتوزع بشكل عشوائي في الكون الخارجي، مما يزيد من إنتروبيا الكون بأكثر من فقدان إنتروبيا الثقب. مرة أخرى تخضع للقانون الثاني.

كم من الوقت يستغرق الثقب الأسود ليتبخر ويختفي؟ الجواب يعتمد على كتلة

الثقب. كلما زاد حجم الثقب، انخفضت درجة حرارته، وبالتالي ضعفت جزيئاته وتبخر ببطء أكبر. ويبلغ إجمالي العمر، كما توصل إليه دون بايج في عام 1975 عندما كان تلميذي وهو كينج، 1.2×10^{67} سنة إذا كانت كتلة الثقب ضعف كتلة الشمس. ويتناسب العمر الافتراضي مع مكعب كتلة الثقب، لذا فإن عمر الثقب الذي كتلته 20 كتلة شمسية يبلغ 1.2×10^{70} سنة. هذه الأعمار هائلة جدًا مقارنة بالعمر الحالي للكون، نحو 1×10^{10} سنة، مما يجعل التبخر غير ذي صلة على الإطلاق بالفيزياء الفلكية. ومع ذلك، كان التبخر مهمًا جدًا لفهمنا للزواج بين النسبية العامة والميكانيكا الكمومية؛ لقد علمنا النضال من أجل فهم التبخر قوانين المجالات الكمومية في الزمكان المنحني.

إن الثقوب الأقل كتلة بكثير من شمسين، إذا كانت موجودة، فسوف تتبخر بسرعة أكبر بكثير من 10^{67} سنة. لا يمكن لمثل هذه الثقوب الصغيرة أن تتشكل في الكون اليوم لأن ضغوط الانتكاس والضغط النووية تمنع الكتل الصغيرة من الانفجار الداخلي، حتى لو انضغطت بكل القوة التي يمكن للكون الحالي حشدتها (الفصلان الرابع والخامس). ومع ذلك، ربما تكون مثل هذه الثقوب قد تشكلت في الانفجار الأعظم، حيث شهدت المادة كثافات وضغوطًا وانضغاطًا بفعل الجاذبية أعلى بكثير من أي نجم في العصر الحديث.

أظهرت الحسابات التفصيلية التي أجراها هو كينج وزيلدوفيش ونوفيكوف وآخرون أن الكتل الصغيرة في المادة الناشئة عن الانفجار الأعظم كان من الممكن أن تنتج ثقوبًا سوداء صغيرة، إذا كانت مادة الكتل ذات معادلة حالة ناعمة إلى حد ما (أي، لو كانت زيادات طفيفة فقط في الضغط عند انضغاطها). إن الضغط القوي من قبل مادة أخرى مجاورة في بداية الكون، مثل ضغط الكربون في فكي سندان قوي لتكوين الألماس، يمكن أن يؤدي إلى انفجار الكتل الصغيرة لإنتاج ثقوب صغيرة.

إحدى الطرق الواعدة للبحث عن مثل هذه الثقوب السوداء البدائية الصغيرة هي البحث عن الجسيمات التي تنتجها عندما تتبخر. من المفترض أن تكون الثقوب السوداء التي تزن أقل من نحو 500 مليار كيلوجرام (5×10^{14} جرام، وهو وزن جبل متواضع) قد تبخرت تمامًا الآن، ويجب أن تظل الثقوب السوداء الأثقل من ذلك عدة مرات في طور التبخر وبقوة. ولمثل هذه الثقوب السوداء آفاق بحجم نواة الذرة.

إن جزءًا كبيرًا من الطاقة المنبعثة من تبخر مثل هذه الثقوب يجب أن يكون الآن على

شكل أشعة جاما (فوتونات عالية الطاقة) تنتقل بشكل عشوائي عبر الكون. وأشعة جاما هذه موجودة بالفعل، ولكن بكميات وخصائص يمكن تفسيرها بسهولة بطرق أخرى. يخبرنا غياب أشعة جاما الزائد (وفقًا لحسابات هوكينج وبايج) أنه لا يوجد الآن أكثر من نحو 300 ثقب أسود صغير شديد التبخر في كل سنة ضوئية مكعبة من الفضاء؛ وهذا بدوره يخبرنا أن المادة في الانفجار الأعظم لا يمكن أن تكون لها معادلة حالة ناعمة للغاية. سوف يجادل المتشككون بأن غياب أشعة جاما الزائدة قد يكون له تفسير آخر: ربما تكونت العديد من الثقوب السوداء الصغيرة في الانفجار الكبير، لكننا، نحن الفيزيائيين، نفهم المجالات الكمومية في الزمكان المنحني بشكل أقل بكثير مما نعتقد، وبالتالي نحن نضلل ذواتنا عندما نعتقد أن الثقوب السوداء تتبخر. أنا وزملائي نقاوم مثل هذه الشكوك بسبب الكمال الظاهري الذي تتشابه به القوانين القياسية للزمكان المنحني، والقوانين القياسية للمجالات الكمومية، لتعطينا مجموعة فريدة تقريبًا من القوانين للمجالات الكمومية في الزمكان المنحني. ومع ذلك، فإننا سنشعر براحة أكبر إذا تمكن علماء الفلك من العثور على أدلة رصدية لتبخر الثقوب الأسود.

1. قد يبدو من غير البديهي أن نظرية هوكينج لزيادة المساحة تسمح بانبعث أي كتلة من الثقوب على شكل موجات جاذبية. قد يجد القراء الذين يراخون في علم الجبر الرضا في مثال الثقبين غير الدوارين اللذين يجتمعان ليتجا ثقبًا واحدًا أكبر حجمًا. تتناسب مساحة سطح الثقب غير الدوار مع مربع محيط أفقها، والذي بدوره يتناسب مع مربع كتلة الثقب. وبالتالي، نصر نظرية هوكينج على أن مجموع مربعات كتل الثقوب الأولية يجب أن يكون أقل من مربع كتلة الثقب النهائية. يُظهر القليل من علم الجبر أن هذا القيد على الكتل يسمح لكتلة الثقب النهائية بأن تكون أقل من مجموع كتل الثقوب الأولية، وبالتالي يسمح بانبعث بعض الكتل الأولية على شكل موجات جاذبية.

2. ويرد تعريف أكثر دقة للأفق الظاهري في الإطار 12.1 أدناه.

3. تضمن قوانين الميكانيكا الكمومية أن عدد طرق توزيع الذرات والجزيئات يكون دائمًا محدودًا، وليس لا نهائيًا أبدًا. عند تعريف الإنتروبي، غالبًا ما يضرب الفيزيائيون لوغارتم هذا العدد من الطرق بثابت لن يكون ذا صلة بالنسبة إلينا، $\log_{10} k$ ، حيث $\log_{10}$ هو «اللوغارتم الطبيعي» للرقم 10، أي $2.30258 \dots$ و k هو «ثابت بولتزمان»، 1.38062×10^{-16} إرج لكل درجة مئوية. طوال هذا الكتاب سأتجاهل هذا الثابت.

4. تُعطى مساحة بلانك-ويلر هذه بالصيغة Gh/c^3 ، حيث $G = 6.670 \times 10^{-8}$ dyne-cehtimeter²/gram²،

- ثابت جاذبية نيوتن، $h = 1.0^{55} \times 10^{-27}$ إرج-ثانية هو ثابت الميكانيكا الكمومية لبلانك. و $c = 2.998 \times 10^{10}$ سنتيمتر/ثانية هي سرعة الضوء. للاطلاع على القضايا ذات الصلة، انظر الحاشية 2 في الفصل الثالث عشر، والحاشية 6 في الفصل الرابع عشر، والمناقشات المرتبطة بها في نص تلك الفصول.
5. لوغاريتم 101079 هو 1079 (إنتروبيا حدسية لبيكنشتاين). لاحظ أن 101079 هو 1 وبعده 1079 صفراً؛ أي أن عدد الأصفار يساوي تقريباً عدد الذرات الموجودة في الكون.
6. تغير اسم شارع فوروييفسكوي منذ ذلك الحين إلى شارع كوسيجين، وأعيد ترقيم مبانيه. في أواخر الثمانينيات، كان لدى ميخائيل جورباتشوف منزل في رقم 10، على بعد عدة أبواب غرب زيلدوفيش.
7. انظر القسم الأخير من الفصل الأول: «طبيعة القانون الفيزيائي».
8. في اللغة العلمية التقنية، بينما تقع الأجزاء الخارجية في «منطقة الإشعاع»، تقع الأجزاء الداخلية في «المنطقة القريبة».
9. تذكر أن الفوتونات والموجات الكهرومغناطيسية هي جوانب مختلفة لنفس الشيء؛ انظر مناقشة ازدواجية الموجة/الجسيم في الإطار 4.1.
10. كان هذا النقص في الاهتمام أكثر وضوحاً لأنه في هذه الأثناء، أظهر تشارلز ميسر في أمريكا أن الموجات الحقيقية (على عكس تقلبات الفراغ التي ذكرها زيلدوفيش) يمكن تضخيمها بواسطة ثقب دوار بطريقة مشابهة للشكل 12.1، وهذا التضخيم -الذي أطلق عليه ميسر اسم «الإشعاع الفائق»- أثار اهتماماً كبيراً.
11. تعالج كلمة «تقريباً» بعض الغموض في إجراء يسمى «إعادة التطبيع»، والذي من خلاله تحسب الطاقة الصافية التي تحملها تقلبات الفراغ. إن هذه الأمور الغامضة، التي حددها ودونها روبرت والد (أحد طلاب ويلر السابقين)، لا تؤثر على تبخر الثقب الأسود، وربما لن تُحل قبل وضع النظرية الكمومية الكاملة للجاذبية في متناول اليد.
12. قد يكون بعض القراء على دراية بهذه المفاهيم في سياق المادة والمادة المضادة، على سبيل المثال، الإلكترون (وهو جسيم من المادة) والبوزيترون (جسيمه المضاد). كما أن المجال الكهرومغناطيسي هو الشكل المجالي للفوتون، كذلك يوجد أيضاً مجال إلكتروني وهو الشكل المجالي للإلكترون والبوزيترون. في التوضعات التي تكون فيها تقلبات فراغ مجال الإلكترون كبيرة لحظياً، من المحتمل أن يظهر إلكترون افتراضي وبوزيترون افتراضي إلى الوجود، كزوج؛ عندما ينتقل المجال إلى الأسفل، من المرجح أن يُفنى الإلكترون والبوزيترون بعضهما بعضاً ويختفيا. الفوتون هو الجسيم المضاد لذاته، لذلك تومض الفوتونات الافتراضية داخل وخارج الوجود في أزواج، وبالمثل بالنسبة إلى الجرافيتونات (جمع جرافيتون).
13. تذكر أنه بما أن الكتلة والطاقة إحداهما قابلة للتحويل تماماً إلى الأخرى، فهما مجرد اسمين مختلفين لنفس المفهوم.
14. العامل الغريب 0.10857... هو في الواقع $1/(4 \log 10)$ حيث $\log 10 = 2.30258$... يتج عن اختياري «لتطبيع» الإنتروبيا؛ انظر الحاشية 3 في الصفحة 423.

الفصل الثالث عشر: داخل الثقوب السوداء

حيث يتصارع الفيزيائيون مع معادلة أينشتاين، للبحث عن سر ما يوجد داخل الثقب الأسود: الطريق إلى عالم آخر، مفردة لها مد وجزر بفعل الجاذبية لانهاية، أم نهاية المكان والزمن، وولادة رغوة الكم؟

المفردات والأكوان الأخرى

ما الذي يوجد داخل الثقب الأسود؟
كيف يمكننا أن نعرف، ولماذا يجب أن نهتم؟
لا يمكن لأي إشارة أن تخرج من الثقب لتخبرنا بالإجابة.
لا يمكن لأي مستكشف مقدام أن يدخل الثقب ليكتشف ذلك ثم يعود ويخبرنا، أو ينقل الإجابة إلينا بأي شكل.
أيًا كان ما قد يكون موجودًا في قلب الثقب، فلا يمكن أبدًا أن يصل إلى كوننا ويؤثر عليه بأي شكل.

إن فضول الإنسان يكاد لا يشبع بمثل هذه الردود. لا سيما عندما تكون لدينا الأدوات التي يمكن أن تخبرنا بالإجابة: قوانين الفيزياء.

علّمنا جون أرثيارد ويلر أهمية السعي لفهم جوهر الثقب الأسود. في الخمسينيات من القرن الماضي، طرح «مسألة الحالة النهائية» لانفجار الجاذبية باعتبارها الكأس المقدسة للفيزياء النظرية، والتي قد تعلّمنا تفاصيل «الزواج الناري» بين النسبية العامة والميكانيكا الكمومية. عندما أصّر روبرت أوبنهايمر على أن الحالة النهائية مخفية عن الأنظار عن طريق الأفق، قاوم ويلر (الفصل السادس) -على الأقل، على ما اعتقد، بسبب معاناته من فقدان إمكانية رؤية حدوث الزواج الناري من خارج الأفق.

وبعد قبول الأفق، احتفظ ويلر باقتناعه بأن فهم قلب الثقب بمثابة الكأس المقدسة التي

تستحق المتابعة. مثلما ساعدنا الكفاح من أجل فهم تبخر الثقوب السوداء على اكتشاف زواج جزئي بين الميكانيكا الكمومية والنسبية العامة (الفصل الثاني عشر)، فإن الكفاح من أجل فهم قلب الثقب الأسود قد يساعدنا على اكتشاف الزواج الكامل؛ قد يقودنا إلى القوانين الكاملة للجاذبية الكمومية. وربما تحمل طبيعة القلب مفاتيح ألغاز أخرى للكون: هناك تشابه بين الانفجار الداخلي «الانسحاق الكبير» الذي قد يموت فيه كوننا على مدى دهور، والانهيار الداخلي للنجم الذي يخلق قلب الثقب الأسود. ومن خلال التعامل مع أحدهما، قد نتعلم عن الآخر.

على مدى خمسة وثلاثين عامًا، سعى الفيزيائيون إلى تحقيق هدف ويلر المقدس، ولكن فقط بنجاح متواضع. نحن لا نعرف حتى الآن على وجه اليقين ما الذي يسكن قلب الثقب، والصراع من أجل الفهم لم يعلمنا بعد بوضوح قوانين الجاذبية الكمومية. لكننا تعلمنا الكثير، ليس أقله أن كل ما يوجد داخل قلب الثقب الأسود يرتبط ارتباطًا وثيقًا بقوانين الجاذبية الكمومية.

يصف هذا الفصل بعض التقلبات والمنعطفات الأكثر إثارة للاهتمام في السعي للحصول على كأس ويلر المقدسة، وإلى أين وصل السعي حتى الآن.

الإجابة المبدئية الأولى عن «ماذا يوجد داخل الثقب الأسود؟»، جاءت بعد ذلك من روبرت أوبنهايمر وهارتلاند سنايدر، في حساباتهما الكلاسيكية لعام 1939 حول الانفجار الداخلي لنجم كروي (الفصل السادس). وعلى الرغم من أن الإجابة كانت موجودة في المعادلات التي نشرها، فإن أوبنهايمر وسنايدر اختارا عدم مناقشتها. ربما كانا يخشيان أن يؤدي ذلك إلى زيادة الجدل الدائر حول توقعهما بأن النجم المتفجر «يقطع نفسه عن بقية الكون» (أي يشكّل ثقبًا أسود). ولعل نزعة أوبنهايمر العلمية المحافظة الفطرية، وعدم رغبته في التكهن، هي التي أبقتهم هادئين. مهما كان السبب، لم يقولوا شيئًا، لكن معادلاتهما تحدثت.

بعد خلق أفق ثقب أسود حول نفسه، تقول معادلاتهما، يستمر النجم الكروي في الانفجار الداخلي، بلا هودة، إلى كثافة لا نهائية وحجم صفر، وعندها يُخلق ويندمج في مفردة الزمكان.

المفردة هي منطقة -وفقًا لقوانين النسبية العامة- يصبح فيها انحناء الزمكان كبيرًا بلا

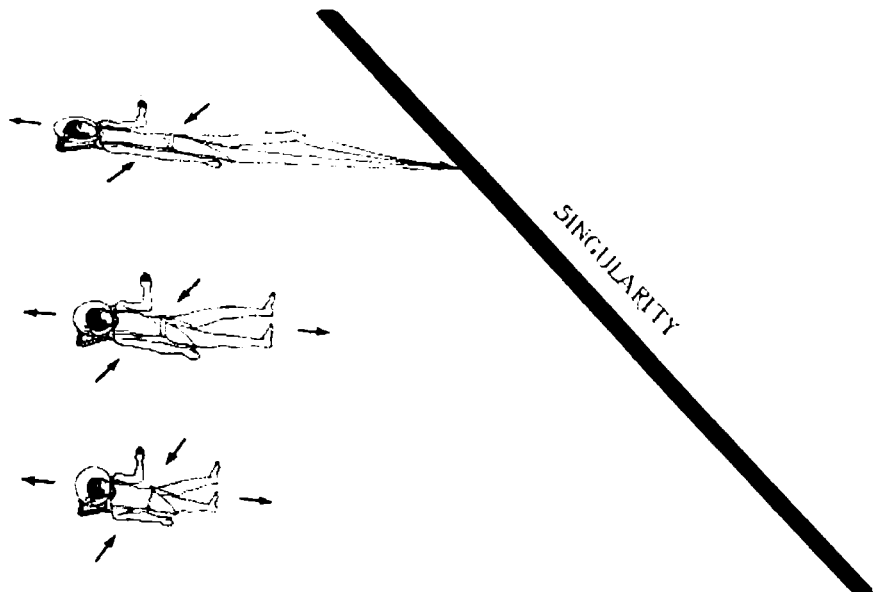
حدود، ويتوقف الزمكان عن الوجود. بما أن المد والجزر بفعل الجاذبية هما مظهران من مظاهر انحناء الزمكان (الفصل الثاني)، فإن المفردة هي أيضًا منطقة ذات مد وجزر بفعل الجاذبية لا نهائية؛ أي أنها منطقة تمتد فيها الجاذبية جميع الأجسام بشكل لا نهائي على طول بعض الاتجاهات وتضغط عليها بشكل لا نهائي في اتجاهات أخرى.

يمكن للمرء أن يتصور مجموعة متنوعة من الأنواع المختلفة من مفردات الزمكان، كل منها له شكله الخاص من التمدد والانضغاط، وسوف نلتقي بعدة أنواع مختلفة في هذا الفصل.

إن المفردة التي تنبأت بها حسابات أوبنهايمر-سنايدر هي أمر بسيط للغاية. المد والجزر بفعل الجاذبية لهما نفس شكل جاذبية الأرض أو القمر أو الشمس؛ وهذا هو نفس شكل المد والجزر بفعل الجاذبية الذي يخلقه المد والجزر على محيطات الأرض (الإطار 2.5): تُمدد المفردة جميع الأشياء بشكل قطري (في الاتجاه نحو ذاته وبعيدًا عنه)، وتضغط على جميع الأشياء بشكل عرضي.

تخيل أن رائد فضاء يسقط بقدميه أولاً في هذا النوع من الثقوب السوداء الذي وصفته معادلات أوبنهايمر وسنايدر. كلما كان الثقب أكبر، كان بإمكانه البقاء على قيد الحياة لفترة أطول، لذا، لتحقيق أقصى طول ممكن للعمر، فليكن الثقب من بين أكبر الثقوب التي تسكن قلوب النجوم الزائفة (الفصل التاسع): 10 مليار كتلة شمسية. ثم يعبر رائد الفضاء الساقط الأفق ويدخل الثقب قبل نحو 20 ساعة من وفاته النهائية، ولكن عند دخوله، لا يزال بعيدًا جدًا عن المفردة بحيث لا يشعر بمد جاذبيتها وجزره. وبينما يستمر في السقوط بشكل تزيد فيه سرعته، ويقترب أكثر فأكثر من المفردة، تزيد قوة المد والجزر بفعل الجاذبية، قبل ثانية واحدة فقط من المفردة، يبدأ في الشعور بها وهي تمد قدميه ورأسه بعيدًا عن بعضهما وتضغط عليه من الجانبين (الصورة السفلية في الشكل 13.1). في البداية، يكون التمدد والانضغاط مزعجين إلى حد ما، لكنهما يستمران في النمو حتى بضعة أجزاء من مئاة من الثانية قبل المفردة (الصورة الوسطى)، ويصبحان قويين جدًا لدرجة أن عظامه ولحمه لا يمكنهما المقاومة. يتفكك جسده ويموت. في آخر مائة ثانية، يستمر التمدد والانضغاط في التصاعد، وعندما يصل إلى المفردة، يصبحان قويين بشكل لا نهائي، أولاً عند قدميه، ثم عند جذعه، ثم عند رأسه؛ ينتفخ جسده إلى ما لا نهاية. وبعد ذلك، وفقًا للنسبية العامة، يندمج مع المفردة ويصبح جزءًا منها.

من المستحيل تمامًا أن يتمكن رائد الفضاء من المضي قدمًا عبر المفردة والخروج من الجانب الآخر، لأنه وفقًا للنظرية النسبية العامة، لا يوجد «جانب آخر». يتوقف المكان والزمن والزمان عن الوجود عند المفردة. المفردة حافة حادة، تشبه إلى حد كبير حافة الورقة. لا توجد ورقة وراء حافتها؛ لا يوجد زمكان خارج المفردة. ولكن هنا تنتهي المقاربة. يمكن للنملة الموجودة على الورقة أن تتجه مباشرة إلى الحافة ثم تتراجع، لكن لا شيء يمكنه التراجع عند المفردة؛ يدمر جميع رواد الفضاء، والجزيئات، والأمواج، وأي شيء آخر؛ أي شيء تضربه المفردة على الفور يدمر، وفقًا لقوانين النسبية العامة لأينشتاين.



13.1 رسم توضيحي للزمكان يصور أول سقوط لرائد فضاء في نقطة المفردة في مركز الثقب الأسود، وفقًا لحسابات أوبنهايمر-سنيدر. كما هي الحال في جميع مخططات الزمكان السابقة (على سبيل المثال، الشكل 6.7)، هناك بُعد مكاني واحد مفقود؛ ولهذا السبب يبدو رائد الفضاء ثنائي الأبعاد وليس ثلاثي الأبعاد. تميل المفردة في هذا الرسم التوضيحي، على عكس موضعه الرأسي في الشكل 6.7 والإطار 12.1، لأن الزمن المرسوم لأعلى والمكان المرسوم أفقيًا هنا يختلف عن هناك. هنا هما الزمن والمكان الخاصان برائد الفضاء؛ هناك كانا الخاصين بفنكلشتاين.

آلية التدمير ليست واضحة تمامًا في الشكل 13.1، لأن الشكل يتجاهل انحناء المكان. في الواقع، عندما يصل جسم رائد الفضاء إلى نقطة المفردة، فإنه يمتد إلى طول لا نهائي

بالفعل ويسحق بشكل عرضي إلى حجم صفر. إن الانحناء الشديد للمكان بالقرب من المفردة يسمح له بأن يصبح طويلاً إلى ما لا نهاية من دون أن يدفع رأسه للخارج عبر أفق الثقب. يُسحب رأسه وقدماه إلى المفردة، لكن يُسحبان إلى مسافة لا نهائية.

لا يقتصر الأمر على تمدد رائد الفضاء وضغطه إلى ما لا نهاية عند نقطة المفردة، وفقاً لمعادلات أوبنهايمر-سنايدر؛ جميع أشكال المادة تتمدد وتنضغط إلى ما لا نهاية، حتى الذرة الفردية؛ وحتى الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات التي تشكّل الذرات؛ وحتى الكواركات التي تشكّل البروتونات والنيوترونات.

هل هناك أي طريقة لرائد الفضاء للهروب من هذا التمدد والانضغاط اللامتناهي؟ لا، ليس بعد أن عبر الأفق.

في كل مكان داخل الأفق، وفقاً لمعادلات أوبنهايمر-سنايدر، تكون الجاذبية قوية جداً (الزمكان معوج بشدة) بحيث يتدفق الزمن نفسه (زمن كل فرد) إلى المفردة¹. نظراً لأن رائد الفضاء، مثل أي شخص آخر، يجب أن يتحرك بلا هوادة إلى الأمام في الوقت المناسب، فهو مدفوع بتدفق الزمن إلى المفردة. بصرف النظر عما يفعله، وبصرف النظر عن كيفية تفجير محركاته الصاروخية، لا يستطيع رائد الفضاء تجنب التمدد والانضغاط اللامتناهي للمفردة.

عندما نرى، نحن الفيزيائيون، أن معادلاتنا تتنبأ بشيء لا نهائي، فإننا نشك في المعادلات. لا شيء تقريباً في الكون الحقيقي يصبح لا نهائياً (كما نعتقد). ولذلك، فإن اللا نهاية هي دائماً علامة على وجود خطأ.

لم يكن التمدد والانضغاط اللامتناهي للمفردة استثناءين. وقد اتفق هؤلاء الفيزيائيون القلائل الذين درسوا الأوراق البحثية لأوبنهايمر وسنايدر خلال الخمسينيات وأوائل الستينيات بالإجماع على أن هناك خطأ ما. ولكن عند هذه النقطة توقف الإجماع.

حددت إحدى المجموعات، بقيادة جون ويلر بقوة، التمدد والانضغاط اللامتناهي كرسالة لا جدال فيها مفادها أن النسبية العامة تفشل داخل الثقب الأسود، عند نقطة نهاية الانفجار الداخلي النجمي. وأكد ويلر أن الميكانيكا الكمومية يجب أن تمنع المد والجزر بفعل الجاذبية من أن يصبحا لا نهائيين هناك، ولكن كيف؟ لمعرفة الإجابة، قال ويلر، إن الأمر يتطلب المزاجية بين قوانين الميكانيكا الكمومية وقوانين المد والجزر بفعل

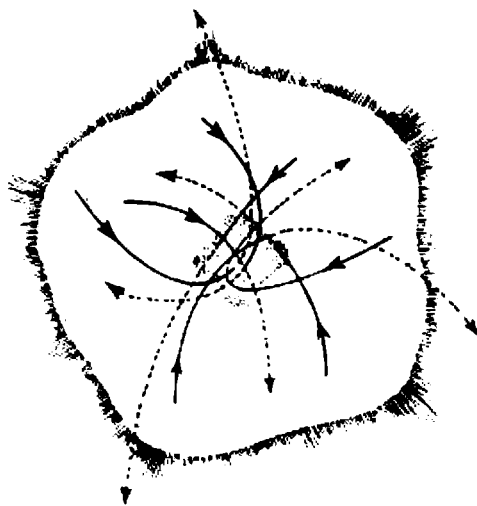
الجاذبية؛ أي مع قوانين النسبية العامة لأينشتاين بشأن الزمكان المنحني. وادعى ويلر أن ذرية هذا الزواج؛ أي قوانين الجاذبية الكمومية، يجب أن تحكم المفردة؛ وهذه القوانين الجديدة قد تخلق ظواهر فيزيائية جديدة داخل الثقب الأسود، وهي ظواهر لا مثل لها على الإطلاق.

أما المجموعة الثانية، بقيادة إسحاق ماركوفيتش خالانتنيكوف ويفجين ميخائيلوفيتش ليفشيتز (أعضاء مجموعة أبحاث ليف لاندوا في موسكو)، فقد رأت أن التمدد والانضغاط اللامتناهيين بمثابة تحذير من أن النموذج المثالي الذي وضعه أوبنهايمر وسنايدر للنجم المتفجر لا يمكن الوثوق به. تذكر أن أوبنهايمر وسنايدر طلبا، كأساس لحساباتهما، أن يكون النجم كرويًا تمامًا ولا يلف محوريًا، وأن تكون له كثافة موحدة، وضغط صفر، وألا تكون له موجات صدمية، أو مادة مقذوفة، أو إشعاع متدفق (الشكل 13.2). جادل خالانتنيكوف ليفشيتز بأن هذه المثالية المتطرفة كانت مسؤولة عن المفردة. كل نجم حقيقي لديه تشوهات عشوائية صغيرة (عدم انتظام صغير وعشوائي في شكله وسرعته وكثافته وضغطه)، وعندما يتفجر النجم، كما زعمنا، فإن هذه التشوهات سوف تنمو بشكل كبير وتوقف الانفجار الداخلي قبل أن تتشكل المفردة. وبالمثل، أكد خالانتنيكوف ليفشيتز، أن التشوهات العشوائية ستوقف الانهيار الكبير لكوننا بأكمله، وبالتالي تنقذ الكون من الدمار في المفردة.

توصل خالانتنيكوف ليفشيتز إلى هذه الآراء في عام 1961 عندما سألا نفسيهما، وفقًا لقوانين النسبية العامة لأينشتاين، ما إذا كانت المفردات مستقرة في مواجهة التقلبات الصغيرة. بمعنى آخر، طرحا نفس السؤال بخصوص المفردات كما التقينا في الفصل السابع فيما يتعلق بالثقوب السوداء: إذا غيّرنا، في أثناء حل معادلة أينشتاين للمجال، شكل انفجار النجم الداخلي، وسرعة مادته وكثافتها وضغطها، بطرق صغيرة ولكن عشوائية، وإذا أدخلنا في المادة كميات صغيرة ولكن عشوائية من إشعاع الجاذبية كيف ستؤثر هذه التغيرات (هذه التقلبات) على نقطة النهاية المتوقعة للانفجار الداخلي؟

بالنسبة إلى أفق الثقب الأسود، كما رأينا في الفصل السابع، فإن التقلبات لا تُحدث أي فرق. لا يزال النجم المضطرب والمنهار يصنع أفقًا، وعلى الرغم من أن الأفق مشوه في البداية، فإن جميع تشوّهاته سرعان ما تشع بعيدًا، تاركة وراءها ثقبًا أسود «بلا شعر» تمامًا. بمعنى آخر، الأفق مستقر ضد الاضطرابات الصغيرة.

كان ضغط النجم صغيراً جداً بحيث لا يشكّل أهمية، فإن الاضطرابات الصغيرة قد تتسبب في انفجار ذرات مختلفة نحو نقاط مختلفة قليلاً بالقرب مركز النجم. معظم الذرات المتفجرة ستخطئ المركز بمقدار صغير وتتأرجح حول المركز وتطير عائدة للخارج، وبالتالي تحوّل الانفجار الداخلي إلى انفجار خارجي. بدا من المعقول أنه على الرغم من فشل قوانين نيوتن للجاذبية داخل الثقب الأسود، فإن بعض الآليات المشابهة لهذه قد تحوّل الانفجار الداخلي إلى انفجار خارجي.



13.3 إحدى آليات تحويل الانفجار الداخلي للنجم إلى انفجار خارجي، عندما تكون الجاذبية ضعيفة بما يكفي لجعل قوانين نيوتن دقيقة، وعندما يكون الضغط الداخلي ضعيفاً بما يكفي ليكون غير مهم. إذا كان النجم المتفجر مشوهاً قليلاً («مقلّباً»)، فإن ذراته تنفجر نحو نقاط مختلفة قليلاً، وتتأرجح حول بعضها، ثم تطير عائدة للخارج.

انضمت إلى مجموعة جون ويلر البحثية كطالب دراسات عليا في عام 1962، بعد وقت قصير من نشر خالاتنيكوف وليفشيتز حساباتهما، وبعد فترة وجيزة من تكريس ليفشيتز مع لاندאו الحساب واستنتاجه «انعدام المفردة» في كتاب مرجعي مشهور، «النظرية الكلاسيكية للمجالات». وأتذكر بوضوح تشجيع ويلر لفريقه البحثي على دراسة الحسابات. وقال لنا إنه إذا كان صحيحاً، فإن عواقبه ستكون عميقة. ولكن من المؤسف أن الحسابات كانت طويلة ومعقدة للغاية، وكانت التفاصيل المنشورة سطحية إلى الحد

الذي لم يسمح لنا بالتحقق منها، وكان خالاتنيكوف وليفيشيتز محصورين داخل الستار الحديدي للاتحاد السوفيتي، لذا لم تتمكن من الجلوس معهما ومناقشة التفاصيل.

ومع ذلك، بدأنا نفكر في إمكانية أن الكون المتفجر داخلياً، عند وصوله إلى حجم صغير جداً، قد «يرتد» وينفجر مرة أخرى في «انفجار أعظم» جديد، وبالمثل فإن النجم المتفجر داخلياً، بعد غرقه داخل أفقه، قد يرتد وينفجر مرة أخرى.

ولكن أين يمكن أن يذهب النجم إذا انفجر خارجياً مرة أخرى؟ ومن المؤكد أنه لا يمكن أن ينفجر مرة أخرى عبر أفق الثقب. تمنع قوانين الجاذبية لأينشتاين أي شيء (باستثناء الجسيمات الافتراضية) من التحليق خارج الأفق. ومع ذلك، كان هناك احتمال آخر: قد يتمكن النجم من الانفجار خارجياً في منطقة أخرى من كوننا، أو حتى في كون آخر.

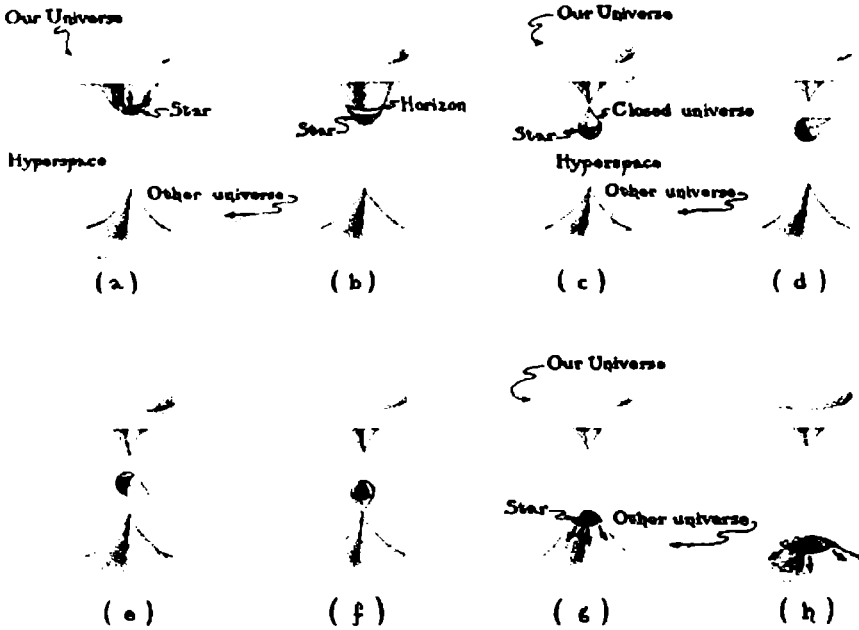
ويصور الشكل 13.4 مثل هذا الانفجار الداخلي وإعادة الانفجار الخارجي باستخدام سلسلة من المخططات المضمنة. (نقدم هنا مخططات التضمين، والتي تختلف تمامًا عن مخططات الزمكان، في الشكلين 3.2 و 3.3).

يصور كل رسم بياني في الشكل 13.4 المكان المنحني لكوننا، والمكان المنحني لكون آخر، كأسطح ثنائية الأبعاد مدمجة في مكان فائق الأبعاد أعلى. [تذكر أن المكان الفائق هو من نسج خيال الفيزيائيين: نحن، كبشر، محصورون دائماً في العيش في مكان كوننا الخاص (أو، إذا تمكنا من الوصول إلى هناك، في مكان الكون الآخر)؛ لا يمكننا أبداً الخروج من تلك المساحات إلى الفضاء الفائق ذي الأبعاد الأعلى المحيطة بنا، ولا يمكننا أبداً استقبال إشارات أو معلومات من المكان الفائق. يعمل المكان الفائق فقط كمساعد في تصور انحناء المكان حول النجم المتفجر وثقبه الأسود، وفي تصور الطريقة التي يمكن أن ينفجر بها النجم داخلياً في كوننا ثم ينفجر خارجياً مرة أخرى في كون آخر].

في الشكل 13.4، يشبه الكونان جزيرتين منفصلتين في المحيط، والمكان الفائق يشبه مياه المحيط. فكما لا يوجد اتصال أرضي بين الجزر، كذلك لا يوجد اتصال مكاني بين الأكوان.

يصور تسلسل الأشكال التوضيحية في الشكل 13.4 تطور النجم. بدأ النجم الموجود في كوننا في الانهيار في الشكل (a). في (b) صنع النجم أفق ثقب أسود حول نفسه

فاستمر في الانفجار الداخلي. في (c) و(d) مادة النجم المنضغطة للغاية تحني الفضاء بإحكام حول النجم، لتشكل كونًا صغيرًا مغلقًا يشبه سطح البالون؛ وهذا الكون الصغير الجديد يتفصل عن كوننا ويتحرك بمفرده إلى المكان الفائق. (يشبه هذا إلى حد ما بناء السكان الأصليين في إحدى الجزر قاربًا صغيرًا والإبحار عبر المحيط). في (d) و(e) يتحرك الكون الصغير، الذي بداخله النجم، عبر المكان الفائق من كوننا الكبير إلى كون كبير آخر (مثل القارب الذي يبحر من جزيرة إلى أخرى). في (f) يلتصق الكون الصغير بالكون الكبير الآخر (مثل هبوط القارب في الجزيرة الأخرى)، فيستمر في التوسع، مفرغًا النجم. وفي (g) و(h) ينفجر النجم في الكون الآخر.



4.13 مخططات التضمين التي تصور المصير الذي يمكن تصوره (على الرغم من أنه غير مرجح للغاية، كما سيتبين لاحقًا في هذا الفصل) للنجم الذي ينفجر ليشكل ثقبًا أسود. المخططات الثمانية، من (a) إلى (h)، هي عبارة عن سلسلة من اللقطات التي توضح تطور النجم وهندسة الفضاء. ينفجر النجم في كوننا (a)، ويشكل أفق ثقب أسود حول نفسه (b). ثم في عمق الثقب، تتفصل منطقة المكان التي تحتوي على النجم عن كوننا وتشكل كونًا صغيرًا مغلقًا لا علاقة له بأي شيء آخر (c). ثم يتحرك هذا الكون المغلق عبر الفضاء الفائق (d, e) ويلتصق بكون كبير آخر (I)؛ ثم ينفجر النجم إلى الخارج في ذلك الكون الآخر (g, h).

أدرك بشكل غير مريح أن هذا السيناريو يبدو وكأنه خيال علمي خالص. ومع ذلك، مثلما كانت الثقوب السوداء نتيجة طبيعية لحل سفارتسشيلد لمعادلة أينشتاين للمجال (الفصل الثالث)، فإن هذا السيناريو أيضًا هو نتيجة طبيعية لحل آخر لمعادلة أينشتاين، وهو الحل الذي وجده هانز رايسنر، وجونار نوردستروم في عامي 1916 و1918. لكنهما لم يفهما بالكامل. في عام 1960، تمكن اثنان من طلاب ويلر، ديتير بريل وجون جريفز، من فك شفرة المعنى الفيزيائي لحل رايسنر-نوردستروم، وسرعان ما أصبح من الواضح أنه، مع تغييرات متواضعة، سيصف حل رايسنر-نوردستروم النجم المتفجر في الشكل 13.4. سيختلف هذا النجم عن نجم أوبنهايمر وسنايدر بطريقة أساسية واحدة فقط: فهو سيحتوي في داخله على شحنة كهربائية كافية لإنتاج مجال كهربائي قوي عندما ينضغط بشدة، ويبدو أن هذا المجال الكهربائي هو المسؤول بطريقة ما عن إعادة الانفجار للنجم في كون آخر.

دعونا نقيم الوضع الذي وصلت إليه الأمور في عام 1964، في سعينا للحصول على كأس ويلر المقدسة؛ أي السعي لفهم المصير النهائي لنجم ينفجر ليشكل ثقبًا أسود:

1. عرفنا أحد حلول معادلة أينشتاين (حل أوبنهايمر-سنايدر) الذي يتنبأ بأنه إذا كان للنجم شكل مثالي للغاية، بما في ذلك الشكل الكروي تمامًا، فإنه سيخلق مفردة ذات مد وجزر بفعل الجاذبية لا نهائية في مركز الثقب. مفردة تأسر وتدمر وتبتلع كل ما يقع في الثقب.

2. عرفنا حلًا آخر لمعادلة أينشتاين (امتدادًا لحل رايسنر-نوردستروم) والذي يتنبأ بأن النجم إذا كان له شكل مثالي مختلف إلى حد ما، بما في ذلك الشكل الكروي والشحنة الكهربائية، ففي أعماق الثقب الأسود يوجد النجم. سوف ينفصل عن كوننا، ويلتصق بكون آخر (أو بمنطقة بعيدة من كوننا)، ثم سينفجر هناك من جديد.

3. لم يكن من الواضح على الإطلاق أي من هذه الحلول، إذا كان أي منها، «مستقرًا ضد التقلبات العشوائية الصغيرة»، وبالتالي كان مرشحًا لحدوثه في الكون الحقيقي.

4. ادعى خالانتيكوف وليفيشيتز أنهما أثبتا أن المفردات تكون دائمًا غير مستقرة ضد التقلبات الصغيرة، وبالتالي لا تحدث أبدًا، وبالتالي لا يمكن أن تحدث مفردات أوبنهايمر-سنايدر أبدًا في كوننا الحقيقي.

5. في برينستون، على الأقل، كان هناك بعض الشكوك حول ادعاء خالاتنيكوف-ليفشيتز. ربما كان الدافع وراء هذه الشكوك جزئيًا هو رغبة ويلر في المفردات، لأنها ستكون بيتًا للـ«تزاوج» بين النسبية العامة والميكانيكا الكمومية.

كان عام 1964 عامًا فاصلاً. هذا العام هو الذي أحدث فيه روجر بنروز ثورة في الأدوات الرياضية التي نستخدمها لتحليل خصائص الزمكان. كانت ثورته مهمة للغاية، وكان لها تأثير كبير على السعي للحصول على كأس ويلر المقدسة، لدرجة أنني سأستطرد لبضع صفحات لوصف ثورته ووصف بنروز نفسه.

ثورة بنروز

نشأ روجر بنروز في عائلة طبية بريطانية. كانت والدته طبيبة، ووالده أستاذًا بارزًا في علم الوراثة البشرية في الكلية الجامعية في لندن، أراد والداه أن يسير واحد على الأقل من أطفالهما الأربعة على خطاهما في مهنة الطب. أوليفر شقيق روجر الأكبر خسارة فادحة. فهو منذ سن مبكرة عزم على العمل في مجال الفيزياء (وفي الواقع سيصبح أحد الباحثين الرائدة في العالم في الفيزياء الإحصائية -دراسة سلوكيات أعداد هائلة من الذرات المتفاعلة). شقيق روجر الأصغر جونان أيضًا خسارة فادحة. كل ما أراد فعله هو لعب الشطرنج (وفي الواقع سيصبح بطل الشطرنج البريطاني لمدة سبع سنوات متتالية). شيرلي، شقيقة روجر الصغيرة، كانت صغيرة جدًا عندما أراد روجر أن يختار مهنة لإظهار ميوله في أي اتجاه (على الرغم من أنها ستُسعد والديها في النهاية بأن تصبح طبيبة). وهذا ما ترك روجر باعتباره الأمل الأكبر لوالديه.

في سن السادسة عشرة، أجرى مدير المدرسة مقابلة مع روجر، مثل كل الآخرين في فصله. لقد حان الوقت لتحديد موضوعات السنتين الأخيرتين من دراسته قبل الجامعة. قال لمدير المدرسة: «أود أن أدرس الرياضيات والكيمياء والأحياء». «لا. مستحيل. لا يمكنك الجمع بين علم الأحياء والرياضيات. يجب أن يكون إما هذا أو ذاك»، هكذا أخبره مدير المدرسة. كانت الرياضيات أكثر قيمة بالنسبة إلى روجر من علم الأحياء. قال: «حسنًا، سأدرس الرياضيات والكيمياء والفيزياء». عندما عاد روجر إلى المنزل في ذلك المساء وجد والداه غاضبين. لقد اتهموا روجر بالاحتفاظ بصحبة سيئة. إن علم الأحياء ضروري لمهنة الطب. كيف يمكن أن يتخلى عنه؟

وبعد ذلك بعامين جاء القرار بشأن ما يجب دراسته في الكلية. يتذكر روجر قائلاً: «اقترحت أن أذهب إلى الكلية الجامعية في لندن وأدرس للحصول على شهادة في الرياضيات». «والدي لم يوافق على الإطلاق. قد تكون الرياضيات مناسبة للأشخاص الذين لا يستطيعون فعل أي شيء آخر، لكنها لم تكن الشيء الصحيح الذي يجب أن يبدأوا به مهنة حقيقية». أصر روجر، لذلك رتب والده مع أحد علماء الرياضيات في الكلية أن يمنحه اختباراً خاصاً. دعا عالم الرياضيات روجر إلى قضاء يوم كامل في الاختبار، وحذره من أنه من المحتمل أن يتمكن من حل واحدة أو اثنتين فقط من المسائل. عندما حل روجر جميع المسائل الاثنتي عشرة بشكل صحيح في بضع ساعات، استسلم والده. يستطيع روجر دراسة الرياضيات.

لم يكن لدى روجر في البداية أي نية لتطبيق رياضياته على الفيزياء. لقد كانت الرياضيات البحتة هي ما أثار اهتمامه. لكنها أغوته.

بدأ الإغواء في عام 1952، عندما استمع روجر -الطالب الجامعي في السنة الرابعة في لندن- إلى سلسلة من المحادثات الإذاعية حول علم الكونيات لفريد هويل. كانت المحادثات رائعة ومحفزة ومربكة بعض الشيء. بعض الأشياء التي قالها هويل لم تكن منطقية تماماً. في أحد الأيام، استقل روجر القطار إلى كامبريدج لزيارة شقيقه أوليفر، الذي درس الفيزياء هناك. وفي نهاية اليوم، وفي أثناء تناول العشاء في مطعم كينجسود، اكتشف روجر أن دينيس سياما -زميل أوليفر في المكتب- يدرس نظرية بوندي-جولد-هويل للحالة المستقرة للكون. كم هو رائع! ربما يستطيع سياما أن يجد حلاً لارتباك روجر. «يقول هويل إنه وفقاً لنظرية الحالة المستقرة، فإن توسع الكون سيؤدي إلى إبعاد المجرة البعيدة عن الأنظار؛ ستخرج المجرة من الجزء الذي يمكن رصده من كوننا. لكنني لا أرى كيف يمكن أن يحدث ذلك». أخرج روجر قلمًا وبدأ في رسم مخطط الزمكان على منديل. «هذا الرسم يجعلني أعتقد أن المجرة سوف تصبح باهتة وأكثر قتامة، ثم ستتحول إلى اللون الأحمر أكثر فأكثر، لكنها لن تختفي تماماً. ما الخطأ الذي ارتكبته؟».

لقد تفاجأ سياما. لم يسبق له أن رأى مثل هذه القوة في مخطط الزمكان. كان بنروز على حق؛ يبدو أن هويل مخطئ. والأهم من ذلك أن شقيق أوليفر الصغير يبدو استثنائياً. ومن ثم، بدأ دينيس سياما مع روجر بنروز النمط الذي سيواصله مع طلابه في الستينيات

(ستيفن هوكينج، وجورج إليس، وبراندون كارتير، ومارتن ريس، وآخرون؛ انظر الفصل السابع). لقد أدخل بنروز في مناقشات طويلة، وجلسات لعدة ساعات، حول الأشياء المثيرة التي تحدث في الفيزياء. كان سياما على علم بكل ما يجري؛ لقد غرس في بنروز حماسه، واستثارته بكل شيء. وسرعان ما أصبح بنروز مدمناً. سيكمل درجة الدكتوراه في الرياضيات، ولكن السعي لفهم الكون من الآن فصاعداً سيدفعه إلى الأمام. سيقضي العقود القادمة بقدم واحدة مغروسة بقوة في الرياضيات، والأخرى في الفيزياء.



روجر بنروز، كاليفورنيا. 1964. [تصوير جودفري أرجنت لصالح معرض الصور الوطني في بريطانيا والجمعية الملكية في لندن؛ إهداء جودفري أرجنت].

غالبًا ما تصل الأفكار الجديدة في لحظات غريبة في أوقات لا يتوقعها المرء على الإطلاق. أفترض أن السبب في ذلك هو أنها تأتي من العقل الباطن للمرء، ويعمل العقل الباطن بشكل أكثر فعالية عندما لا يكون الجزء الواعي من العقل في حالة تأهب قصوى. ومن الأمثلة الجيدة على ذلك اكتشاف ستيفن هوكينج عام 1970، عندما كان يستعد

للنوم، أن مساحات آفاق الثقب الأسود يجب أن تتزايد دائماً (الفصل الثاني عشر). مثال آخر هو اكتشاف روجر بنروز الذي غيّر فهمنا لما يوجد داخل الثقب الأسود.

في أحد أيام أواخر خريف عام 1964، في أثناء سير بنروز -الذي أصبح حينها أستاذاً في كلية بيركبيك في لندن- نحو مكتبه مع صديقه إيفور روبنسون؛ على مدار العام الماضي، منذ اكتشاف النجوم الزائفة وعلماء الفلك يشرعون في التكهن بأنها مدعومة بالانفجار النجمي (الفصل التاسع)، في حين أن بنروز يحاول معرفة ما إذا كانت المفردة قد أنشأتها نجوم واقعية، مشوهة عشوائياً، ومتفجرة؛ وبينما يمشي ويتحدث مع روبنسون، أخذ عقله الباطن يفكر في أجزاء هذا اللغز -القطع التي ناضل عقله الواعي معها لعدة ساعات.

وكما يتذكر بنروز: «توقفت محادثتي مع روبنسون للحظات عندما عبرنا طريقاً جانبياً، واستؤنفت مرة أخرى على الجانب الآخر. من الواضح أنه خلال تلك اللحظات القليلة خطرت في بالي فكرة، لكن المحادثة التي تلت ذلك محتها من ذهني! وفي وقت لاحق من اليوم، بعد أن غادر روبنسون، عدت إلى مكتبي. أتذكر شعوراً غريباً بالبهجة لم أستطع تفسيره. بدأت أفكر في كل الأشياء المختلفة التي حدثت لي خلال النهار، في محاولة للعثور على السبب الذي تسبب في هذه البهجة. وبعد استبعاد العديد من الاحتمالات غير الكافية، أُعيدت إلى ذهني أخيراً الفكرة التي راودتني في أثناء عبور الشارع».

كانت الفكرة جميلة، على عكس أي شيء شوهد من قبل في الفيزياء النسبية. خلال الأسابيع القليلة التالية، تلاعب بنروز بها بعناية، ونظر إليها من هذا الاتجاه ثم من ذلك، وعمل على التفاصيل، وجعلها ملموسة ودقيقة رياضياً قدر استطاعته. ومع توفر التفاصيل كافة، كتب مقالاً قصيراً للنشر في مجلة مراجعة الخطابات الفيزيائية، واصفاً فيه مسألة المفردة في الانفجار الداخلي للنجوم، ومن ثم إثبات النظرية الرياضية.

تقول نظرية بنروز تقريباً ما يلي: لنفترض أن نجماً -أي نوع من النجوم على الإطلاق- ينفجر بعيداً بحيث تصبح جاذبيته قوية بما يكفي لتشكّل أفقاً ظاهرياً؛ أي قوياً بما يكفي لسحب أشعة الضوء الصادرة إلى الداخل مرة أخرى (الإطار 12.1). بعد حدوث ذلك، لا شيء يمكن أن يمنع الجاذبية من النمو بقوة كبيرة لدرجة أن تخلق المفردة. وبالتالي (بما أن الثقوب السوداء لها دائماً آفاق واضحة)، يجب أن يكون لكل ثقب أسود مفردة داخله.

إن الشيء المثير للدهشة في نظرية المفردة هذه هو قوتها الكاسحة. لم يتعامل فقط مع النجوم المتفجرة المثالية التي لها خصائص خاصة ومثالية (مثل أن تكون كروية بدقة أو ليس لها أي ضغط)؛ ولم يقتصر الأمر على التعامل مع النجوم التي تكون تشوهات العشوائية الأولية صغيرة جدًا. بدلاً من ذلك، تعاملت مع كل النجوم المتفجرة التي يمكن تخيلها، وبالتالي ضمت كل النجوم الحقيقية المتفجرة التي تسكن كوننا الحقيقي بلا شك. اكتسبت نظرية المفردة لبنروز قوتها المذهلة من أداة رياضية جديدة استخدمها في إثباتها، وهي أداة لم يستخدمها أي فيزيائي من قبل في حسابات الزمكان المنحني؛ أي في الحسابات النسبية العامة: الطوبولوجيا.

الطوبولوجيا هي فرع من الرياضيات يتعامل مع الطرق النوعية التي ترتبط بها الأشياء بعضها ببعض أو بنفسها. على سبيل المثال، فنجان القهوة والدونات «لهما نفس الهيكل»، لأنه (إذا كان كلاهما مصنوعًا من المعجون) يمكننا تشويه أحدهما حتى يصبح في شكل الآخر بسلاسة وبشكل مستمر من دون تمزيقه؛ أي من دون تغيير أي اتصالات (الشكل 13.5 a). على النقيض من ذلك، فإن الكرة لها طوبولوجيا مختلفة عن كعكة الدونات؛ لتشويه كرة إلى كعكة دونات، يجب علينا أن نُحدث ثقبًا فيها، وبالتالي تغيير كيفية ارتباطها بنفسها (الشكل 13.5 b).

تهتم الطوبولوجيا فقط بالاتصالات، وليس بالأشكال أو الأحجام أو الانحناءات. على سبيل المثال، الدونات وفنجان القهوة لهما أشكال وانحناءات مختلفة تمامًا، لكن لهما نفس الهيكل.

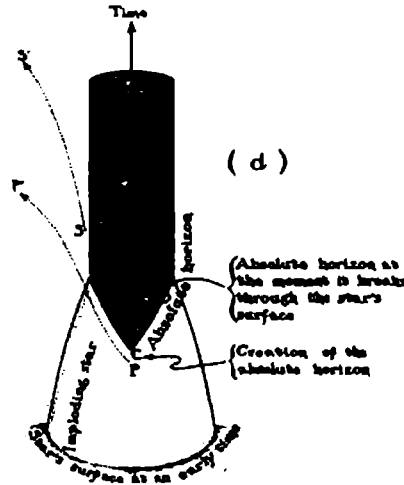
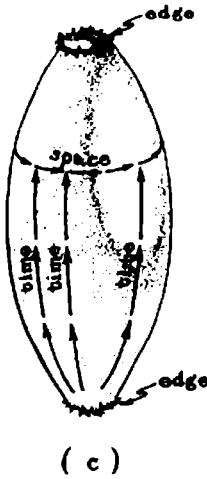
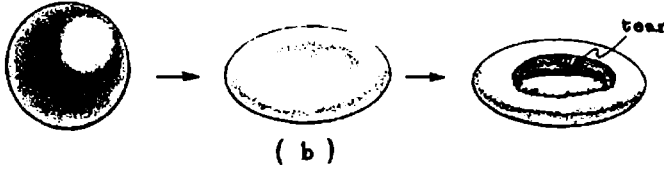
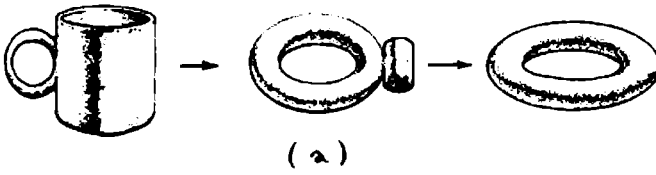
نحن الفيزيائيون، قبل نظرية المفردة لبنروز، تجاهلنا الطوبولوجيا لأننا كنا نركز اهتمامنا على حقيقة أن انحناء الزمكان هو المفهوم المركزي للنسبية العامة، ولا يمكن للطوبولوجيا أن تخبرنا بأي شيء عن الانحناء. (في الواقع، نظرًا لأن نظرية بنروز كانت مبنية بقوة على الطوبولوجيا، فإنها لم تخبرنا بشيء عن انحناء المفردة؛ أي أنها لم تخبرنا بشيء عن تفاصيل المد والجزر بفعل الجاذبية. لقد أخبرتنا النظرية ببساطة بأنه في مكان ما داخل الثقب الأسود، يصل الزمكان إلى نقطة النهاية، وبأن أي شيء يصل إلى تلك النهاية يدمر. كيفية تدميره هي مجال أو موضوع هذا الانحناء؛ وأنه سيدمر في نهاية الزمكان هو مجال أو موضوع الطوبولوجيا).

لو أننا، نحن الفيزيائيين، قبل بنروز، نظرنا فقط إلى ما هو أبعد من مسألة الانحناء، لأدركنا أن النسبية تتعامل مع مسائل الطوبولوجيا، أسئلة مثل: «هل ينتهي الزمكان (هل لدينا حافة يتوقف بعدها الزمكان عن الوجود)؟» (الشكل 13.5c)، و«ما مناطق الزمكان التي يمكنها إرسال إشارات لبعضها، وأيها لا يمكنها ذلك؟» (الشكل 13.5d). أول هذه الأسئلة الطوبولوجية أساسي في المفردات؛ والثاني أساسي في تكوين ووجود الثقوب السوداء وأيضًا في علم الكونيات (في البنية واسعة النطاق وتطور الكون).

هذه القضايا الطوبولوجية مهمة جدًا، والأدوات الرياضية للطوبولوجيا قوية جدًا في التعامل معها، لدرجة أنه من خلال تعريفنا بالطوبولوجيا، أحدث بنروز ثورة في بحثنا.

انطلاقًا من أفكار بنروز الأساسية، خلال منتصف وأواخر الستينيات من القرن العشرين، ابتكر بنروز وهوكينج وروبرت جيروش وجورج إليس وغيرهم من الفيزيائيين مجموعة قوية من الأدوات الطوبولوجية والهندسية المدمجة لحسابات النسبية العامة، وهي الأدوات التي تسمى الآن الأساليب العالمية. باستخدام هذه الأساليب، أثبت هوكينج وبنروز في عام 1970 -من دون أي افتراضات مثالية- أن كوننا لا بد أنه كانت لديه مفردة زمكانية في بداية توسع الانفجار الأعظم، وإذا انهار مرة أخرى، فلا بد أن ينتج مفردة في انسحاقه العظيم. وباستخدام هذه الأساليب العالمية، ابتكر هوكينج عام 1970 مفهوم الأفق المطلق للثقب الأسود وأثبت أن المساحات السطحية للأفق المطلق تتزايد دائمًا (الفصل الثاني عشر).

دعونا نعود الآن إلى عام 1965. لقد كان المسرح ممهّدًا لمواجهة بالغة الأهمية. لقد أثبت إسحاق خالانتيكوف ويفجينى ليفشيتز في موسكو (أو هكذا اعتقدا) أنه عندما ينفجر نجم حقيقي ذو تشوهات داخلية عشوائية ليشكّل ثقبًا أسود، فإنه لا يمكنه إنشاء مفردة في مركز الثقب، في حين أثبت روجر بنروز في إنجلترا أنه يجب أن يكون لكل ثقب أسود نقطة مفردة في مركزه.



13.5 جميع المسائل التالية تتناول طبيعة الروابط بين النقاط؛ أي أنها قضايا طوبولوجية. (a) يمكن تشويه فنجان القهوة (يسار) والدونات (يمين) إلى بعضهما بسلاسة وبشكل مستمر من دون تمزيق، وبعبارة أخرى، من دون تغيير الطبيعة النوعية لأي من الروابط بين النقاط. وبالتالي لديهما نفس الطوبولوجيا. (b) لتشويه كرة (يسار) إلى كمكة دونات (يمين)، يجب على المرء أن يُحدث ثقباً فيها. (c) الزمكان الموضح هنا له حافتان حادثان [مماثلة للتمزق في (b)]: حافة واحدة يبدأ عندها الزمن (مماثلة لبداية الانفجار الأعظم لكوننا)، والأخرى ينتهي عندها الزمن (مماثلة للانسحاق العظيم). يمكن للمرء أيضاً أن يتصور كوناً كان موجوداً طوال الوقت وسيظل موجوداً إلى الأبد؛ لن يكون للزمكان في مثل هذا الكون أي حواف. (d) المنطقة السوداء من الزمكان هي الجزء الداخلي للثقب الأسود؛ والمنطقة البيضاء هي المنطقة الخارجية (انظر الإطار 12.1). لا يمكن للنقاط الموجودة في الداخل إرسال أي إشارات إلى نقاط في الخارج.

كانت قاعة المحاضرات تتسع لـ 250 شخصًا وممتلئة حتى فاضت عندما نهض إسحاق خالانتنيكوف ليتحدث في يوم صيفي دافئ من عام 1965، حيث اجتمع كبار الباحثين في مجال النسبية على مستوى العالم في لندن لحضور المؤتمر الدولي الثالث حول النسبية العامة والجاذبية. إن هذه هي الفرصة الأولى، في مثل هذا التجمع العالمي، لإسحاق خالانتنيكوف ويفجيني ليفشيتز لتقديم تفاصيل برهانهما على أن الثقوب السوداء لا تحتوي على أي مفردات.

إن الإذن بالسفر إلى ما وراء الستار الحديدي أصبح يُمنح ويُسحب بِقَدْرِ من التقلب النسبي في الاتحاد السوفيتي خلال العقود التي تلت وفاة ستالين إلى عهد جورباتشوف. سافر ليفشيتز -على الرغم من أنه يهودي- بحرية إلى حدّ ما في أواخر الخمسينيات من القرن الماضي، لكنه أصبح الآن مدرجًا على القائمة السوداء للسفر وسيظل كذلك حتى عام 1976. ووجه خالانتنيكوف ضربتين ضده؛ فهو يهودي ولم يسافر إلى الخارج قط. (كان من الصعب للغاية الحصول على إذن للقيام بالرحلة الأولى). ولكن بعد صراع قوي، بما في ذلك مكالمات هاتفية توسط له فيها نائب رئيس أكاديمية العلوم -نيكولاي نيكولايفيتش سيمينوف- إلى اللجنة المركزية للحزب الشيوعي، حصل خالانتنيكوف أخيرًا على إذن بالقدوم إلى لندن.

بينما خالانتنيكوف يتحدث في قاعة المحاضرات المزدحمة في لندن، وهو يسحب معه ميكروفونًا، كتب معادلات في جميع أنحاء السبورة، والتي امتدت بعرض الغرفة بالكامل البالغ 50 قدمًا. لم تكن أساليبه طوبولوجية. لكنها الأساليب القياسية المكثفة للمعادلات التي استخدمها الفيزيائيون لعقود من الزمن عند تحليل انحناء الزمكان. أثبت خالانتنيكوف رياضياً أن الاضطرابات العشوائية يجب أن تنمو عندما يتفجر النجم. وهذا يعني -كما أكد- أنه إذا شكّل الانفجار الداخلي مفردة، يجب أن تكون تشوهات عشوائية تمامًا في انحناء الزمكان الخاصة بها. ثم وصف كيف بحث هو وليفشيتز، من بين جميع أنواع المفردات التي تسمح بها قوانين النسبية العامة، عن واحدة ذات تشوهات انحناء عشوائية تمامًا. لقد أظهر، رياضياً، نوعًا تلو الآخر من المفردات؛ فهرس أنواع مفردات حتى الغثيان. ولم يكن لدى أي منها تشوهات عشوائية تمامًا. لذلك، استنتج -في ختام محاضراته التي امتدت لأربعين دقيقة- أن النجم المتفجر مع الاضطرابات العشوائية لا يمكن أن ينتج مفردة. يجب أن تنقذ الاضطرابات النجم من الدمار.

ومع انتهاء التصفيق، قفز تشارلز ميسنر، أحد أذكي طلاب ويلر السابقين، واعترض بشدة. بحماسة، وبقوة، وبلغة إنجليزية سريعة، وصف ميسنر النظرية التي أثبتها بنروز قبل بضعة أشهر. إذا كانت نظرية بنروز صحيحة، فمن المؤكد أن خالاتنيكوف وليفشيتز مخطئان.

كان الوفد السوفييتي مرتبكًا وغاضبًا. كانت لغة ميسنر الإنجليزية سريعة جدًا بحيث لا يمكن متابعتها، وبما أن نظرية بنروز اعتمدت على حجج طوبولوجية فهي تعد غريبة على خبراء النسبية، لقد اعتبرها السوفييت مشبوهة. وعلى النقيض من ذلك، استند تحليل خالاتنيكوف-ليفشيتز إلى أساليب مجربة وحقيقية. وأكدوا أن بنروز ربما مخطئ.

خلال السنوات القليلة التالية، تعمق خبراء النسبية في الشرق والغرب في تحليل بنروز، وتحليل خالاتنيكوف-ليفشيتز. في البداية بدا كلا التحليلين مشبوهًا؛ كلاهما احتوى على عيوب خطيرة ومحملة. ومع ذلك، تدريجيًا، عندما بدأ الخبراء في إتقان وتوسيع تقنيات بنروز الطوبولوجية، أصبحوا مقتنعين بأن بنروز هو الذي على حق.

في سبتمبر 1969، بينما كنت عضوًا زائرًا في فريق أبحاث زيلدوفيش في موسكو، جاءني يفجينى ليفشيتز ومعه مخطوطة كتبها هو وخالاتنيكوف للتو. لقد طلب مني طلبًا: «من فضلك، كيب، أعد هذه المخطوطة إلى أمريكا من أجلي وأرسلها إلى دورية مراجعة الخطابات الفيزيائية». وأوضح أن أي مخطوطة مكتوبة في اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية، بصرف النظر عن محتواها، تصنف تلقائيًا على أنها سرية حتى ترفع السرية عنها، وسيستغرق رفع السرية ثلاثة أشهر. سمح النظام السوفييتي السخيف لي أو لأي زائر أجنبي آخر بقراءة المخطوطة في أثناء وجودي في موسكو، لكن المخطوطة نفسها لا ينبغي أن تغادر البلاد حتى توافق عليها وتمررها الرقابة. كانت هذه المخطوطة ثمينة جدًا، وعاجلة جدًا بحيث لا تحتل مثل هذا التأخير السخيف. أوضح لي ليفشيتز أنها تحتوي على استسلامهما واعترافهما بالخطأ: بنروز على حق؛ نحن الخاطئان.

في عام 1961، لم يتمكن من العثور، من بين حلول معادلة أينشتاين للمجال، على أي مفردة مع تشوهات عشوائية على الإطلاق، ولكن الآن، وبدافع من نظرية بنروز، تمكنا هما وطالب الدراسات العليا فلاديمير بيلينسكي من العثور على واحدة. لقد اعتقدوا أن هذه المفردة الجديدة يجب أن تنهي الانفجار الداخلي للنجوم المشوهة عشوائيًا وهي التي قد

تدمر كوننا يومًا ما في نهاية الانسحاق العظيم. [وفي الواقع، في عام 1993، أعتقد أنهم ربما كانوا على حق. بالنسبة إلى وجهة نظر عام 1993 هذه، وإلى طبيعة مفردتهم الجديدة في BKL («بيلينسكي-خالانتيكوف-ليفشيتز»)، سأعود للحديث عنها قرب نهاية هذا الفصل].



حفلة عشاء في شقة إسحاق خالانتيكوف في موسكو، يونيو 1971. باتجاه عقارب الساعة من اليسار: كيب ثورن، جون ويلر، يفغيني ليفشيتز، إسحاق خالانتيكوف، زوجة خالانتيكوف فالتينا نيكولايفنا، فلاديمير بيلينسكي، إلينورا ابنة خالانتيكوف. [إيدان من تشارلز ديليو ميسنر].

بالنسبة إلى عالم الفيزياء النظرية، من المحرج جدًا الاعتراف بخطأ كبير في نتيجة منشورة. إنه تحطيم للأنا/الإيجو. ينبغي لي أن أعرف. في عام 1966، أخطأت في حساب نبضات النجوم القزمة البيضاء، وبعد مرور عامين، ضللت حساباتي الخاطئة علماء الفلك لفترة وجيزة وجعلتهم يعتقدون أن النجوم النابضة المكتشفة حديثًا قد تكون أقزامًا بيضاء نابضة. إنه خطئي، ولما عثر عليه، كان كبيرًا بما يكفي لظهوره في افتتاحية مجلة نيتشر البريطانية. إنها حبة دواء مريرة يجب ابتلاعها.

ورغم أن مثل هذه الأخطاء يمكن أن تكون مدمرة بالنسبة إلى فيزيائي أمريكي أو أوروبي، فإنها أسوأ بكثير في الاتحاد السوفييتي. إن موقع المرء في ترتيب العلماء مهم

بشكل خاص في الاتحاد السوفيتي؛ لقد حددت أشياء مثل إمكانيات السفر إلى الخارج والانتخاب لأكاديمية العلوم، والتي بدورها جلبت امتيازات مثل مضاعفة راتبه تقريباً وسيارة ليموزين بسائق في تناول اليد. وهكذا فإن إغراء محاولة إخفاء الأخطاء أو التقليل من أهميتها - عند حدوث الأخطاء - أكبر بالنسبة إلى العلماء السوفيت مقارنة بالغربيين. هكذا كان نداء ليفشيتز للمساعدة مثيراً للإعجاب. لم يرغب في أي تأخير في نشر الحقيقة، وكانت مخطوطته صريحة: فقد اعترفت بالخطأ وأعلنت أن الإصدارات المستقبلية من النظرية الكلاسيكية للمجالات (كتاب لاندau-ليفشيتز حول النسبية العامة) ستعدل لإزالة الادعاء بأن الانفجار الداخلي حين يحدث لا ينتج مفردة.

حملت المخطوطة إلى أمريكا، مخبأة بين أوراق الشخصية، ونشرت. لم تلاحظ السلطات السوفيتية ذلك قط.

لماذا أدخل عالم فيزياء بريطاني (بنروز) وليس فيزيائياً أمريكياً أو فرنسياً أو سوفيتياً الأساليب الطوبولوجية في الأبحاث النسبية؟ ولماذا اتبع الأساليب الطوبولوجية فيزيائيون بريطانيون آخرون في الفيزياء النسبية طوال الستينيات بقوة ونجاح، لكنها ترسخت بشكل أبداً بكثير في أمريكا وفرنسا والاتحاد السوفيتي وأماكن أخرى؟

أعتقد أن السبب هو التدريب الجامعي لعلماء الفيزياء النظرية البريطانيين. عادة ما يتخصصون في الرياضيات كطلاب جامعيين، ثم يحصلون على درجة الدكتوراه. البحث في أقسام الرياضيات التطبيقية أو أقسام الرياضيات التطبيقية والفيزياء النظرية. على النقيض من ذلك، في أمريكا، عادة ما يتخصص الفيزيائيون النظريون الطموحون في الفيزياء كطلاب جامعيين، ثم يحصلون على درجة الدكتوراه في أبحاث أقسام الفيزياء. وبالتالي، فإن علماء الفيزياء النظرية البريطانيين الشباب على دراية جيدة بتخصصات الرياضيات الدقيقة التي لم تشهد الكثير من تطبيقات الفيزياء بعد، ولكن قد تكون لديهم خلفية ضعيفة في موضوعات الفيزياء «الجريئة» مثل سلوكيات الجزيئات والذرات والأنوية الذرية. وعلى النقيض من ذلك، فإن شباب الفيزياء النظرية الأمريكيين لا يعرفون سوى القليل من الرياضيات بما يتجاوز ما علمهم إياه أساتذتهم في الفيزياء، ولكنهم على دراية عميقة بسلوك الجزيئات، والذرات، والأنوية.

لقد سيطرنا نحن الأمريكيون إلى حد كبير على الفيزياء النظرية منذ الحرب العالمية

الثانية، كما فرضنا على مجتمع الفيزياء العالمي معاييرنا الرياضية المتدنية إلى حد فاضح. يستخدم معظمنا الرياضيات الموجودة قبل خمسين عامًا، ونحن غير قادرين على التواصل مع علماء الرياضيات المعاصرين. ومع ضعف تدريبنا الرياضي، أصبح من الصعب علينا نحن الأمريكيين استيعاب الأساليب الطوبولوجية والبدء في استخدامها عندما قدمها بنروز.

إن علماء الفيزياء النظرية الفرنسيين، حتى أكثر من البريطانيين، مدربون جيدًا في الرياضيات. ومع ذلك، خلال ستينيات وسبعينيات القرن الماضي، كان منظرو النسبية الفرنسيون منشغلين بالدقة الرياضية (أي الكمال)، وقللوا من التركيز على الحدس الفيزيائي، لدرجة أنهم لم يساهموا كثيرًا في فهمنا للنجوم المتفجرة والثقوب السوداء. لقد أدى سعيهم إلى الدقة إلى إبطائهم إلى درجة أنهم، وعلى الرغم من معرفتهم الجيدة برياضيات الطوبولوجيا، لم يتمكنوا من منافسة البريطانيين. لم يحاولوا حتى؛ لقد تركز انتباههم في مكان آخر.

إن ليف دافيدوفيتش لاندوا، وهو المسؤول إلى حد كبير عن قوة الفيزياء النظرية السوفييتية في الفترة من ثلاثينيات إلى ستينيات القرن العشرين، كان أيضًا مصدرًا للمقاومة السوفييتية للطوبولوجيا: فقد نقل لاندوا الفيزياء النظرية من أوروبا الغربية إلى الاتحاد السوفييتي في ثلاثينيات القرن العشرين (الفصل الخامس). كأداة واحدة في عملية نقل الدم هذه، أنشأ مجموعة من الاختبارات في الفيزياء النظرية، تسمى «الحد الأدنى النظري»، والتي طلب اجتيازها كمدخل إلى مجموعته البحثية. يمكن لأي شخص، بصرف النظر عن خلفيته التعليمية، أن يسير في الشارع ويتقدم لهذه الامتحانات، لكن القليل منهم يستطيع اجتيازها. وفي التسعة والعشرين عامًا من الحد الأدنى النظري (1933-1962)، لم ينجح سوى 43 فردًا منهم، لكن جزءًا ملحوظًا من هؤلاء الثلاثة والأربعين واصل تحقيق اكتشافات فيزيائية عظيمة.



يفجيني ميخائيلوفيتش ليفشيتز (يسار) وليف دافيدوفيتش لاندau (يمين) في غرفة لاندau في شقته في معهد المشكلات الفيزيائية، شارع فورويبيفسكوي رقم 2، موسكو، في عام 1954.
[إهداء من زوجة ليفشيتز، زينايدا إيفانوفنا ليفشيتز].

تضمن الحد الأدنى النظري للاندau مسائل من جميع فروع الرياضيات التي اعتبرها لاندau مهمة للفيزياء النظرية. الطوبولوجيا لم تكن من بينها. يغطي هذا الحد الأدنى النظري حساب التفاضل والتكامل، والمتغيرات المعقدة، والنظرية النوعية للمعادلات التفاضلية، ونظرية المجموعات، والهندسة التفاضلية؛ ستكون هناك حاجة إليها جميعًا في مهنة الفيزيائي. ولكن لن تكون هناك حاجة إلى الطوبولوجيا. لم يكن لدى لاندau

أي شيء ضد الطوبولوجيا. لقد تجاهلها فحسب؛ إنها غير ذات صلة من وجهة نظره -وأصبحت وجهة نظره حول عدم أهميتها قريبة من الإنجيل بين معظم علماء الفيزياء النظرية السوفيت في الأربعينيات وحتى الستينيات.

لقد نقل هذا الرأي إلى علماء الفيزياء النظرية في جميع أنحاء العالم من خلال مجموعة الكتب المرجعية، التي تسمى دورة الفيزياء النظرية، والتي كتبها لاندau وليفشيتز. وأصبحت هذه -في جميع أنحاء العالم- مجموعة النصوص الفيزيائية الأكثر تأثيراً في القرن العشرين، ومثل اختبارات الحد الأدنى النظري التي أجراها لاندau، تجاهلت الطوبولوجيا.

ومن الغريب أن التقنيات الطوبولوجية قد أدخلت في الأبحاث النسبية بطريقة فاشلة، قبل وقت طويل من نظرية بنروز، من قبل اثنين من علماء الرياضيات السوفيت في لينينجراد: ألكسندر دانييلوفيتش ألكساندروف وريفولت إيفانوفيتش بيمينوف. في الفترة من 1950 إلى 1959، استخدم ألكساندروف الطوبولوجيا لاستكشاف «البنية السببية» للزمكان؛ أي لدراسة العلاقات بين مناطق الزمكان التي يمكنها التواصل مع بعضها، وتلك التي لا تستطيع ذلك. كان هذا مجرد نوع من التحليل الطوبولوجي الذي من شأنه أن يؤدي في نهاية المطاف إلى تحقيق مكاسب كبيرة في نظرية الثقوب السوداء. بنى ألكساندروف شكلية طوبولوجية قوية وجميلة إلى حد ما، وفي منتصف الخمسينيات من القرن الماضي، التقطت هذه الشكلية ودُفعت إلى أبعد من ذلك من قبل بيمينوف، وهو زميل شاب لألكساندروف.

لكن في النهاية لم يؤدِّ هذا البحث إلى أي شيء. لم يكن لدى ألكساندروف وبيمينوف سوى اتصالات قليلة مع الفيزيائيين المتخصصين في الجاذبية. كان هؤلاء الفيزيائيون يعرفون ما هي أنواع الحسابات المفيدة وما هي غير المفيدة. ربما أخبروا ألكساندروف وبيمينوف أن مفردة النجوم أو انفجار الجاذبية الداخلي للنجوم يستحق التحقق من خلال صيغهما الرياضية. لكن لم يكن من الممكن تقديم مثل هذه النصيحة في لينينجراد؛ كان الفيزيائيون الرئيسيون يعملون على بُعد 600 كيلومتر جنوب شرق لينينجراد، في موسكو، وكانوا يجهلون الطوبولوجيا والطوبولوجيين. لقد ازدهرت الصيغة الرياضية لألكساندروف-بيمينوف، ثم دخلت في حالة سبات.

لقد أُجبر مصير ألكساندروف وبيمينوف على هذا السبات: أصبح ألكساندروف عميدًا (رئيسًا) لجامعة لينينجراد، ولم يكن لديه الوقت الكافي لمزيد من البحث. أُلقي القبض على بيمينوف في عام 1957 بتهمة تأسيس «مجموعة مناهضة للسوفييت»، وسُجن لمدة ست سنوات، ثم بعد سبع سنوات من الحرية اعتُقل مرة أخرى وأُرسل إلى المنفى لمدة خمس سنوات في جمهورية كومي، على بُعد 1200 كيلومتر شرق لينينجراد.

لم يسبق لي أن التقيت بألكساندروف أو بيمينوف، ولكن الحكايات عن بيمينوف ظلت تُحكى داخل مجتمع العلماء في لينينجراد عندما زرتها في عام 1971، بعد عام من اعتقال بيمينوف للمرة الثانية. قالت الشائعات إن بيمينوف نظر إلى الحكومة السوفيتية على أنها فاسدة أخلاقيًا، ومثله كمثّل العديد من الشباب في أمريكا في أثناء حرب فيتنام، شعر بيمينوف أنه إذا تعاون مع الحكومة فإن فساد الحكومة سوف يطاله. الطريقة الوحيدة للشعور بالنظافة الأخلاقية هي من خلال العصيان المدني. في أمريكا، العصيان المدني يعني رفض التسجيل للتجنيد. بالنسبة إلى بيمينوف، العصيان المدني يعني ساميزدات samizdat. إن «ساميزدات» بمثابة «النشر الذاتي» للمخطوطات المحظورة. ترددت شائعات أن بيمينوف سيتلقى من أصدقائه مخطوطة مُنع نشرها في الاتحاد السوفيتي، وسيطبعها في ست نسخ باستخدام ورق الكربون، ثم سيمرر تلك النسخ بعد ذلك إلى أصدقاء آخرين، وهم بدورهم سيكررون العملية. قُبض على بيمينوف، وأُدين، وحُكم عليه بالمنفى لمدة خمس سنوات في جمهورية كومي، حيث عمل كقاطع أشجار وكهربائي لماكينات ورشة نجارة، حتى استغلت أكاديمية كومي للعلوم منفاه وخصصت له كرسيًا في قسم الرياضيات الخاص بهم.

أخيرًا تمكن بيمينوف من ممارسة الرياضيات مرة أخرى، وواصل دراساته الطوبولوجية للزمكان. بحلول ذلك الوقت، كانت الطوبولوجيا قد ترسخت كأداة رئيسية لأبحاث الجاذبية التي يجريها الفيزيائيون، لكن بيمينوف ظل معزولًا عن كبار الفيزيائيين في بلاده. لم يكن لديه قُط التأثير الذي قد يُحدثه في ظل ظروف أخرى.

وعلى النقيض من ألكساندروف وبيمينوف، عاش روجر بنروز بقدم واحدة راسخة في مجتمع الرياضيات والأخرى راسخة في الفيزياء، وهو ما أصبح مصدرًا رئيسيًا لنجاحه.

أفضل التخمينات

ربما من الممكن أن يظن المرء أن نظرية المفردة لبرنوز ستحسم نهائياً مسألة ما يوجد داخل الثقب الأسود. لكن هذا لم يحدث. بدلاً من ذلك، فتح الباب أمام مجموعة جديدة من الأسئلة، وهي الأسئلة التي واجهها الفيزيائيون، بنجاح متواضع، منذ منتصف الستينيات. إن هذه الأسئلة وأفضل إجاباتنا لعام 1993 «أفضل تخميناتنا» وهي أفضل طريقة لقول ذلك)، هي:

1. هل كل ما يدخل الثقب تبتلعه المفردة بالضرورة؟

- نعتقد ذلك، لكننا لسنا متأكدين.

2. هل هناك أي طريق من داخل الثقب إلى كون آخر، أو إلى جزء آخر من كوننا؟

- على الأرجح لا، لكننا لسنا متأكدين تماماً.

3. ما مصير الأشياء التي تدخل المفردة؟

- نعتقد أن الأشياء التي تسقط عندما يكون الثقب صغيراً جداً تتمزق بسبب المد والجزر بفعل الجاذبية بطريقة عنيفة وفوضوية، قبل أن تصبح الجاذبية الكمومية مهمة. ومع ذلك، فإن الأشياء التي تسقط في ثقب قديم قد تبقى سالمة حتى تواجه قوانين الجاذبية الكمومية وجهًا لوجه.

وفي بقية هذا الفصل سأشرح هذه الإجابات بمزيد من التفصيل.

تذكر أن أوبنهايمر وسنايدر أعطيانا إجابة واضحة لا جدال فيها على أسئلتنا الثلاثة: عند إنشاء الثقب الأسود بواسطة نجم مثالي للغاية، كروي، متفجر، عندها (1) تبتلع المفردة كل ما يدخل الثقب؛ (2) لا شيء ينتقل إلى كون آخر أو إلى جزء آخر من كوننا؛ (3) عند الاقتراب من نقطة المفردة، يتعرض كل شيء لتمدد عمودي متزايد بشكل لا نهائي وانضغاط عرضي (الشكل 13.1 العلوي)، وبالتالي يدمر. هذه الإجابة مفيدة من الناحية التدريسية. فقد ساعدت في تحفيز الحسابات التي أدت إلى فهم أعمق. ومع ذلك، فإن الفهم الأعمق (بفضل خالاتيكوف وليفيشيتز) أظهر أن إجابة أوبنهايمر-سنايدر لا علاقة لها بالكون الحقيقي الذي نعيش فيه، لأن التشوهات العشوائية التي تحدث في

جميع النجوم الحقيقية ستغير الجزء الداخلي للثقب تمامًا. الجزء الداخلي من أوبنهايمر-سنايدر «غير مستقر في مواجهة التقلبات الصغيرة».

كما أعطى حل رايسنر-نوردستروم لمعادلة مجال أينشتاين إجابة واضحة بيّنة: عند إنشاء الثقب الأسود بواسطة نجم معين، مثالي للغاية، وكروي، ومشحون كهربائيًا، فإن النجم المتفجر والأشياء الأخرى التي تقع فيه يمكن أن تنقل النجم المتفجر، عبر «كون مغلق صغير»، من داخل الثقب إلى كون كبير آخر (الشكل 13.4).

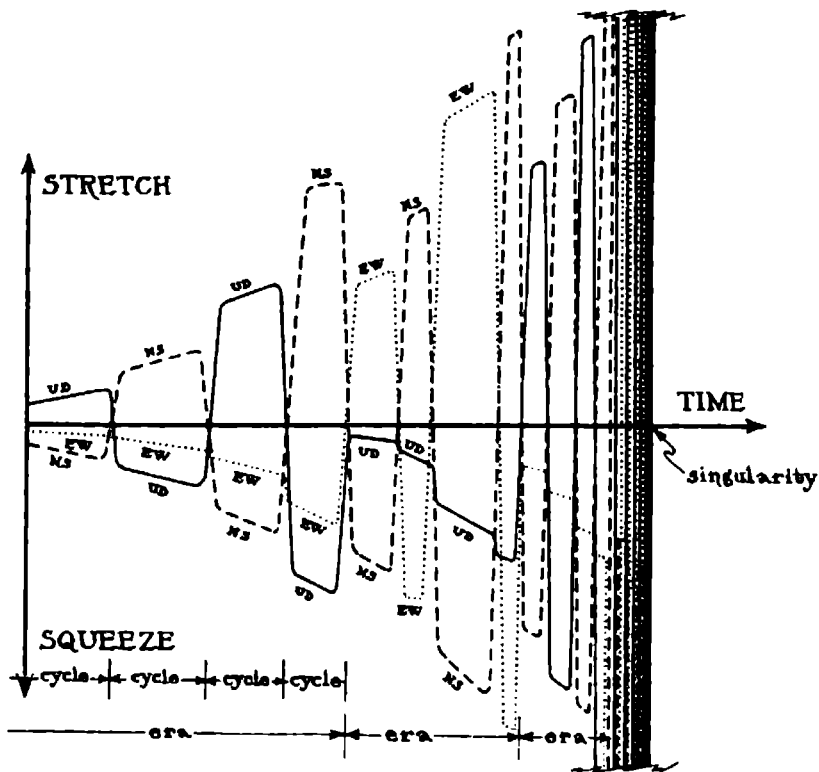
هذه الإجابة مفيدة أيضًا من الناحية التدريسية (وقد زودت المطابع بالعديد من كُتّاب الخيال العلمي). ومع ذلك، مثل تنبؤ أوبنهايمر-سنايدر، فإنها لا علاقة لها بالكون الحقيقي الذي نعيش فيه لأنه غير مستقر ضد التقلبات الصغيرة. وبشكل أكثر تحديدًا، في كوننا الحقيقي، يتعرض الثقب الأسود للقصاف باستمرار بواسطة تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسية الصغيرة وكميات ضئيلة من الإشعاع. عندما تسقط هذه التقلبات والإشعاعات داخل الثقب، تعمل جاذبية الثقب على تسريعها إلى طاقة هائلة، ثم تضرب بشكل انفجاري وتدمر الكون الصغير المغلق، قبل أن يبدأ الكون الصغير رحلته. لقد توصل بنروز إلى هذا الحدث في عام 1968، وأمكن التحقق منه منذ ذلك الحين في العديد من الحسابات المختلفة، التي أجراها العديد من الفيزيائيين المختلفين.

لقد أعطانا بيلينسكي وخالاتنيكوف وليفشيتز إجابة أخرى على أسئلتنا، وهذه الإجابة، كونها مستقرة تمامًا ضد التقلبات الصغيرة، ربما تكون الإجابة «الصحيحة»، الإجابة التي تنطبق على الثقوب السوداء الحقيقية التي تسكن كوننا: النجم الذي يشكّل الثقب وكل ما يقع في الثقب يتمزق عندما تكون الثقوب صغيرة بسبب المد والجزر بفعل الجاذبية لمفردة BKL. (هذا هو نوع المفردة الذي اكتشفه بيلينسكي، وخالاتنيكوف، وليفشيتز، كحل لمعادلة أينشتاين، بعد أن أقنعهم بنروز بأن المفردات يجب أن تسكن الثقوب السوداء).

يختلف المد والجزر بفعل الجاذبية لمفردة BKL جذريًا عن جاذبية مفردة أوبنهايمر-سنايدر. تمتد مفردة أوبنهايمر-سنايدر وتضغط على رائد الفضاء الساقط (أو أي شيء آخر) بطريقة ثابتة ولكن متزايدة؛ يكون التمدد عموديًا دائمًا، ويكون الانضغاط مستعرضًا دائمًا، وتنمو قوة التمدد والانضغاط بشكل ثابت وسلس (الشكل 13.1). على النقيض

من ذلك، فإن مفردة BKL تشبه إلى حد ما آلات سحب الحلوى التي يراها المرء أحياناً في متاجر الحلوى أو في الكرنفالات. فهي تمتد وتضغط أولاً في هذا الاتجاه، ثم ذاك، ثم في الاتجاه الآخر، ثم في اتجاه آخر، ثم اتجاه آخر. يتأرجح التمدد والانضغاط مع مرور الزمن بطريقة عشوائية وفوضوية (كما يقيسها رائد الفضاء الساقط)، لكن في المتوسط يصبح تذبذباتهما أسرع وأسرع كلما اقترب رائد الفضاء أكثر فأكثر من المفردة. أطلق تشارلز ميسنر (الذي اكتشف هذا النوع من المفردة المتأرجح بشكل مستقل عن بيلينسكي وخالاتنيكوف وليفشيتز) على هذا اسم تذبذب ميكس ماستر (تذبذب مضرب البيض)، لأنه يمكن للمرء أن يتخيله وهو يخلط أجزاء جسم رائد الفضاء بالطريقة التي يخلط بها مضرب البيض أو الميكس ماستر بياض البيضة وصفارها. ويصور الشكل 13.6 مثلاً محدداً لكيفية تأرجح قوى المد والجزر، لكن التسلسل الدقيق للتذبذبات لا يمكن التنبؤ به بشكل عشوائي.

في نسخة ميسنر من مفردة الميكس ماستر، كانت التذبذبات هي نفسها في كل مكان في الفضاء، في لحظة معينة من الزمن (كما قاسها رائد الفضاء على سبيل المثال). ليس الأمر كذلك بالنسبة إلى مفردة BKL. إن تذبذباتها فوضوية مكانياً وفوضوية زمنياً، تماماً كما تكون الحركات المضطربة للزبد في موجة المحيط المتكسرة فوضوية في المكان كما في الزمن. على سبيل المثال، بينما يتمدد رأس رائد الفضاء ثم ينضغط بالتناوب («الضرب») على طول الاتجاه الشمالي/الجنوبي، قد تضرب قدمه اليمنى على طول الاتجاه الشمالي الشرقي/الجنوب الغربي، وقدمه اليسرى على طول الاتجاه الجنوبي الشرقي/الشمالي الغربي. وقد تكون ترددات ذبذبة الضرب مختلفة تماماً على رأسه وقدمه اليسرى وقدمه اليمنى.



13.6 مثال على كيفية تأرجح قوى المد والجزر مع مرور الزمن في مفردة BKL. تعمل قوى المد والجزر بطرق مختلفة على طول ثلاثة اتجاهات متعامدة مختلفة. هذه الاتجاهات، من أجل التحديد، تسمى هنا UD («لأعلى / أسفل»)، NS («لشمال / جنوب»)، و EW («لشرق / غرب»)، ويصف كل من المنحنيات الثلاثة سلوك قوى المد والجزر على أحد هذه الاتجاهات. يرسم الزمن أفقيًا. في أي زمن عندما يكون منحنى UD فوق المحور الزمني الأفقي، تمتد قوى المد والجزر على طول اتجاه UD، بينما في الزمن الذي يكون فيه منحنى UD أسفل المحور، فإن قوى المد والجزر تضغط. كلما زاد المنحنى فوق المحور، كان الامتداد أقوى؛ كلما انخفض المنحنى أسفل المحور، كان الضغط أقوى. لاحظ ما يلي: (i) في أي لحظة من الزمن يكون هناك ضغط في اتجاهين وتمدد في اتجاه واحد. (ii) تتأرجح قوى المد والجزر بين التمدد والضغط؛ كل تذبذب يسمى «دورة». (iii) تجمع الدورات في «العصور». خلال كل عصر، بينما يتعرض أحد الاتجاهات الثلاثة لضغط ثابت إلى حد ما، يتأرجح الاتجاهان الآخران بين التمدد والضغط. (iv) عندما يتغير العصر، هناك تغيير في الاتجاه الثابت. (v) مع الاقتراب من نقطة المفردة، تصبح الاهتزازات سريعة بشكل لا نهائي وتصبح قوى المد والجزر قوية بشكل لا نهائي. إن تفاصيل تقسيم الدورات إلى عصور وتغير أنماط التذبذبات في بداية كل عصر يحكمها ما يطلق عليه أحيانًا «الخريطة الفوضوية».

تتنبأ معادلة أينشتاين بأنه عندما يصل رائد الفضاء إلى نقطة المفردة، فإن قوى المد والجزر تنمو بشكل لا نهائي، وتصبح تذبذباتها الفوضوية سريعة بشكل لا نهائي. يموت رائد الفضاء وتصبح الذرات التي يتكون منها جسده مشوهة ومختلطة بشكل لا نهائي وفوضوي - وبعد ذلك، في اللحظة التي يصبح فيها كل شيء لا نهائيًا (قوى المد والجزر، وترددات التذبذب، والتشوهات، والاختلاط)، يتوقف الزمكان عن الوجود.

إن قوانين الميكانيكا الكمومية هي شيء يمنع الـ«ما لا نهايات». بالقرب من المفردة، كما فهمناها على أفضل وجه في عام 1993، تندمج قوانين الميكانيكا الكمومية مع قوانين النسبية العامة لأينشتاين وتغير «قواعد اللعبة» تمامًا. القواعد الجديدة تسمى الجاذبية الكمومية.

لقد مات رائد الفضاء بالفعل، وأجزاء جسده مختلطة تمامًا بالفعل، والذرات التي صُنع منها مشوهة بالفعل بدرجة لا يمكن التعرف عليها عندما تتولى الجاذبية الكمومية زمام الأمور. ولكن لا يوجد شيء لا نهائي. «اللعبة» مستمرة.

متى تتولى الجاذبية الكمومية زمام الأمور، وماذا تفعل؟ أفضل ما فهمناه في عام 1993 (وفهمنا ضعيف إلى حد ما)، هو أن الجاذبية الكمومية تتولى المسؤولية عندما يصبح المد والجزر بفعل الجاذبية المتذبذبة (انحناء الزمكان) كبيرًا جدًا لدرجة أنه يشوه جميع الأجسام تمامًا في نحو 10^{-43} ثانية أو أقل. ثم يغير بشكل جذري طبيعة الزمكان: فهو يمزق توحد المكان والزمن في الزمكان. إنه يفصل المكان والزمن عن بعضهما، ثم يدمر الزمن كمفهوم ويدمر تحديدية المكان. الزمن لم يعد موجودًا. ولم يعد بإمكاننا أن نقول إن «هذا الشيء يحدث قبل ذلك»، لأنه من دون الزمن لا يوجد مفهوم «قبل» أو «بعد». المكان، وهو البقايا الوحيدة المتبقية مما كان ذات يوم زمكانًا موحدًا، يصبح زبدًا عشوائيًا واحتماليًا، مثل رغوة الصابون.

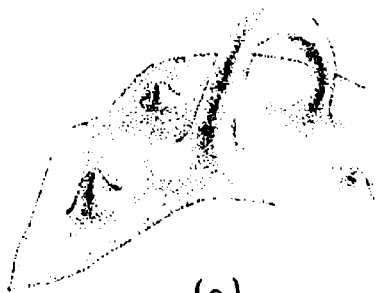
قبل تمرقه (أي خارج المفردة)، يكون الزمكان مثل قطعة من الخشب مشربة بالماء. في هذا التشبيه، يمثل الخشب المكان، ويمثل الماء الزمن، وكلاهما (الخشب والماء؛ المكان والزمن) متشابك بإحكام وموحد. إن المفردة وقوانين الجاذبية الكمومية التي تحكمها، هي مثل النار التي يُلقي فيها الخشب المشرب بالماء. تغلي النار الماء من الحطب، تاركة الحطب وحيدًا وضعيفًا؛ في المفردة، تدمر قوانين الجاذبية الكمومية الزمن، تاركة المكان

وحيداً وضعيفاً. ثم تحول النار الخشب إلى زبد من الرقائق والرماد. ثم تحوّل قوانين الجاذبية الكمومية المكان إلى زبد عشوائي احتمالي.

وهذه الرغبة العشوائية الاحتمالية هي التي تتكون منها المفردة، والزبد تحكمه قوانين الجاذبية الكمومية. في الزبد، ليس للمكان أي شكل محدد (ما يعني: أي شكل محدد للانحناء، أو حتى أي طوبولوجيا محددة). بدلاً من ذلك، يمتلك الفضاء احتمالات مختلفة لهذا أو ذاك أو أي انحناء أو طوبولوجيا أخرى. على سبيل المثال، داخل المفردة قد يكون هناك احتمال بنسبة 0.1 بالمائة لانحناء وطوبولوجيا الفضاء بالشكل الموضح في 13.7 a، واحتمال بنسبة 0.4 بالمائة بالشكل الموضح في 13.7 b، واحتمال بنسبة 0.02 بالمائة للشكل الموضح في الشكل 13.7 c، وهكذا. وهذا لا يعني أن المكان يقضي 0.1٪ من زمنه في الشكل (a)، و 0.4٪ من زمنه في الشكل (b)، و 0.02٪ من زمنه في الشكل (c)، لأنه لا يوجد شيء اسمه زمن داخل المفردة. وبالمثل، لأنه لا يوجد زمن، فمن غير المعجدي على الإطلاق أن تتساءل عما إذا كان المكان يتخذ الشكل (b) «قبل» أو «بعد» أن يتخذ الشكل (c). السؤال الوحيد ذو المعنى الذي يمكن للمرء أن يطرحه عن المفردة هو: «ما احتمالات أن يكون المكان الذي خُلقت منه له الأشكال (a)، و(b)، و(c)؟»، وستكون الإجابات ببساطة 0.1، و 0.4، و 0.02 بالمائة.

ونظرًا لأن جميع الانحناءات والطوبولوجيات التي يمكن تصورها مسموح بها داخل المفردة، بصرف النظر عن مدى وحشيتها، يمكن القول إن المفردة مصنوعة من رغبة احتمالية. جون ويلر، الذي قال لأول مرة إن هذه هي طبيعة المكان عندما تتحكم قوانين الجاذبية الكمومية، أطلق عليها اسم الكمومية/الرغبة.

للتلخيص، في مركز الثقب الأسود، في منطقة الزمكان حيث تصل قوى المد والجزر المتذبذبة BKL إلى ذروتها، هناك مفردة: منطقة لم يعد فيها الزمن موجوداً، وقد أفسح المكان المجال للرغبة الكمومية.



(a)



(b)



(c)

13.7 مخططات التضمين التي توضح الرغوة الكمومية التي يُعتقد أنها موجودة في المفردة داخل الثقب الأسود. هندسة وطوبولوجيا الفضاء ليستا محددتين؛ بدلاً من ذلك، فهما احتماليتان. قد يكون لديهما، على سبيل المثال، احتمال بنسبة 0.1 بالمائة للصيغة الموضحة في (a)، واحتمال بنسبة 0.4 بالمائة لـ (b)، واحتمال بنسبة 0.02 بالمائة للشكل (c)، وهلم جرا.

تتمثل إحدى مهام قوانين الجاذبية الكمومية في التحكم في احتمالات الانحناءات والطوبولوجيا المختلفة داخل مفردة الثقب الأسود. وهناك طريقة أخرى -فرضية- هي تحديد احتمالات أن تولّد المفردة «أكوانًا جديدة»؛ أي أن تولّد مناطق جديدة كلاسيكية (غير كمومية) من الزمكان، بنفس المعنى الذي ولّدت به مفردة الانفجار الأعظم كوننا منذ نحو 15 مليار سنة.

ما مدى احتمالية أن تؤدي خاصية الثقب الأسود إلى ولادة «أكوان جديدة»؟ نحن لا نعرف. قد لا يحدث هذا أبدًا، أو قد يكون شائعًا جدًا، أو قد نكون على المسار الخاطئ تمامًا في الاعتقاد بأن المفردات مصنوعة من الرغوة الكمومية.

قد تأتي الإجابات الواضحة في العقد أو العقدين المقبلين من الأبحاث التي يجريها الآن (في وقت كتابة الكتاب) ستيفن هوكينج، وجيمس هارتل، وآخرون، بناءً على الأسس التي وضعها جون ويلر وبريس ديويت 3.

معظم كل شيء في الكون يتغير بالتقادم: النجوم تستهلك وقودها وتموت؛ تفقد الأرض غلافها الجوي تدريجيًا عن طريق التبخر في الفضاء وستصبح في النهاية كوكبًا ميتًا خاليًا من الهواء؛ ونحن البشر نصبح متجعين وحكماء.

وقوى المد والجزر الموجودة في أعماق الثقب الأسود، بالقرب من المفردة، ليست استثناءً. ويجب أن تتغير أيضًا بالتقادم، وفقًا للحسابات التي أجراها فيرنر إسرائيل وإريك بواسون من جامعة ألبرتا في عام 1991، وعاموس أوري، باحث ما بعد الدكتوراه في مجموعتي في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا (استنادًا إلى أعمال سابقة لأندرية دوروشكيفيتش وإيجور نوفيكوف). عندما يكون الثقب حديث الولادة، تُظهر قوى المد والجزر الداخلية تذبذبات عنيفة وفوضوية من نوع BKL (الشكل 13.6 العلوي). ومع ذلك، مع تقادم الثقب، تصبح التذبذبات الفوضوية أكثر هدوءًا وألطف، وتختفي تدريجيًا.

على سبيل المثال، رائد فضاء يقع في ثقب كتلته 10 مليارات كتلة شمسية في قلب نجم زائف، خلال الساعات القليلة الأولى بعد ولادة الثقب، سوف يتمزق إربًا بسبب قوى BKL للمد والجزر المتذبذبة بشدة. ومع ذلك، فإن رائد الفضاء الثاني، الذي ينتظر حتى يوم أو يومين بعد ولادة الثقب قبل أن يغوص فيه، سيواجه قوى مد وجزر متأرجحة بشكل أكثر لطفًا. لا يزال التمدد والانضغاط تحت تأثير قوى المد والجزر كبيرين بما يكفي لقتل رائد الفضاء الثاني، ولكن كونهما أكثر لطفًا من اليوم السابق، فإن التمدد والانضغاط المتذبذب سيسمحان لرائد الفضاء الثاني بالبقاء على قيد الحياة لفترة أطول، والاقتراب من المفردة قبل وفاته، أكثر مما فعل رائد الفضاء الأول. وسيواجه رائد فضاء ثالث، الذي ينتظر حتى يبلغ عمر الثقب سنوات عديدة قبل أن يغطس، مصيرًا ألطف. لقد أصبحت قوى المد والجزر المحيطة بالمفردة الآن مروضة ووديدة للغاية، وفقًا لحسابات إسرائيل وبواسون وأوري، لدرجة أن رائد الفضاء لن يشعر بها على الإطلاق. سوف يبقى على قيد الحياة، سالمًا تقريبًا، حتى حافة مفردة الجاذبية الكمومية الاحتمالية. فقط عند حافة المفردة، تمامًا عندما يواجه قوانين الجاذبية الكمومية، سيقتل رائد الفضاء -ولا يمكننا حتى أن نكون متأكدين تمامًا من أنه سيقتل حينها، لأننا لا نفهم جيدًا على الإطلاق قوانين الجاذبية الكمومية وعواقبها.

إن تقادم قوى المد والجزر الداخلية للثقب الأسود ليست حتمية. كلما سقطت المادة والإشعاع (أو رواد الفضاء) في الثقب، فسوف يغذيان وينشطان قوى المد والجزر، مثلما تنشط قطعة لحم أسدًا. إن التمدد والانضغاط التذبذبي بالقرب من المفردة، بعد تغذيتهما، سوف يصبحان أقوى لفترة قصيرة، ثم سيتلاشيان ويصبحان هادئين مرة أخرى.

في أواخر الخمسينيات وأوائل الستينيات من القرن الماضي، كان لدى جون ويلر حلم، وأمل، بأننا نحن البشر قد نتمكن يومًا ما من سبر أغوار المفردة ونرى الجاذبية الكمومية وهي تعمل -والتي قد نتمكن من سبر أغوارها ليس فقط باستخدام الرياضيات والمحاكاة الحاسوبية، ولكن أيضًا بيانات رصدية وتجارب حقيقية وفيزيائية. لقد حطم أوبنهايمر وسنايدر هذا الأمل (الفصل السادس). الأفق الذي اكتشفنا تشكيله حول نجم منفجر يخفي المفردة عن المشاهد الخارجي. إذا بقينا إلى الأبد خارج الأفق، فلن تكون هناك طريقة يمكننا من خلالها استكشاف المفردة. وإذا غطسنا في أفق ثقب قديم ضخم، وبقينا على قيد الحياة لنلتقي بمفردة الجاذبية الكمومية وجهاً لوجه، لا توجد طريقة يمكننا من خلالها نقل وصف لقائنا مرة أخرى إلى الأرض. لا يمكن لناقلنا أن يفلت من الثقب؛ سيخفيه الأفق.

على الرغم من أن ويلر قد تخلى منذ فترة طويلة عن حلمه ويؤيد الآن بقوة وجهة النظر القائلة بأنه من المستحيل التحقيق في المفردات، فإنه ليس من المؤكد على الإطلاق أنه على حق. من المتصور أن بعض الانفجارات النجمية غير الكروية تنتج مفردات عارية؛ أي مفردات غير محاطة بأفاق، وبالتالي يمكن ملاحظتها وسبرها من الكون الخارجي، حتى من الأرض.

في أواخر الستينيات، بحث روجر بنروز بجد، رياضياً، عن مثال للانفجار الداخلي الذي يخلق مفردة عارية. وجاء بحثه فارغاً. كلما أدى الانفجار الداخلي في معادلته إلى خلق مفردة، فإنه يخلق أيضًا أفقًا حول المفردة. ولم يتفاجأ بنروز. بعد كل شيء، إذا تشكلت مفردة عارية، فمن المعقول أن نتوقع أنه، قبل أن تشكل المفردة مباشرة، يمكن للضوء أن يهرب من جوارها؛ وإذا كان للضوء القدرة على الإفلات، إذن (على ما يبدو) يمكن أيضًا للمادة التي تنفجر لتكوين المفردة أن تهرب؛ وإذا تمكنت المادة المتفجرة من الهروب، فمن المفترض أن الضغط الداخلي الهائل للمادة سوف يجعلها تفلت، وبالتالي سينعكس الانفجار الداخلي وستمنع المفردة من التشكل في المقام الأول. هكذا

بدا الأمر. ومع ذلك، لم تكن تلاعبات بنروز الرياضية ولا أي شخص آخر قوية بما يكفي للتحديث بيقين.

في عام 1969، كان بنروز مقتنعًا بشدة بأن المفردة العارية لا يمكن أن تتشكل، ولكنه غير قادر على إثبات ذلك، واقترح حدسًا، وهي حدسية الرقابة الكونية: لا يمكن لأي جسم منفجر أن يشكّل مفردة عارية؛ فإذا تشكلت مفردة فلا بد أن ترنّدي أفقًا حتى لا نراها نحن في الكون الخارجي.

لقد تبنى أعضاء «كنيسة» الفيزياء -فيزيائيون مثل جون ويلر، الذي تعتبر وجهات نظره الأكثر تأثيرًا- الرقابة الكونية واعتنقوها على أنها صحيحة بشكل شبه مؤكد. ومع ذلك، بعد مرور ما يقرب من ربع قرن على اقتراح بنروز، لا تزال الرقابة الكونية غير مثبتة؛ وتشير عمليات المحاكاة الحاسوبية الحديثة للانفجار الداخلي للنجوم غير الكروية إلى أن ذلك قد يكون خاطئًا. بعض الانفجارات الداخلية، وفقًا لهذه المحاكاة التي أجراها ستيفارت شابيرو وسول تيوكولسكي من جامعة كورنيل، قد تؤدي في الواقع إلى خلق مفردات عارية. أقول قد. وليس سوف تخلق، فقط قد.

ستيفن هوكينج هو مثال للكنيسة الفيزيائية هذه الأيام، وأنا وجون بريسكيل (زميل لي في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا) نستمتع بتعديل هذه الكنيسة قليلًا. لذلك، في عام 1991، راهنت أنا وبريسكيل مع هوكينج (الشكل 13.8). نحن نراهن على أن الرقابة الكونية خاطئة؛ يمكن أن تتشكل المفردة العارية في كوننا. يراهن هوكينج على أن الرقابة الكونية صحيحة؛ لا يمكن للمفردات العارية أن تتشكل أبدًا.

**Whereas Stephen W. Hawking firmly believes that
naked singularities are an anathema and should
be prohibited by the laws of classical physics,**

**And whereas John Preskill and Kip Thorne
regard naked singularities as quantum
gravitational objects that might exist unclothed
by horizons, for all the Universe to see,**

**Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne
accept, a wager with odds of 100 pounds sterling
to 50 pounds sterling, that when any form of
classical matter or field that is incapable of
becoming singular in flat spacetime is coupled to
general relativity via the classical Einstein
equations, the result can never be a naked
singularity.**

**The loser will reward the winner with clothing to
cover the winner's nakedness. The clothing is to
be embroidered with a suitable concessionary
message.**



Stephen W. Hawking

**Stephen W. Hawking John P. Preskill & Kip S. Thorne
Pasadena, California, 24 September 1991**

13.8 الرهان بيني وبين ستيفن هو كينج وجون بريسكيل على صحة حدسية بنروز حول الرقابة الكونية.

بعد أربعة أشهر فقط من موافقته على الرهان، اكتشف هو كينج نفسه دليلاً رياضياً (ولكن ليس دليلاً قاطعاً) على أنه عندما يكمل الثقب الأسود تبخره (الفصل الثاني عشر)، قد لا يختفي تمامًا كما توقع سابقاً، ولكنه بدلاً من ذلك قد يختفي تاركاً وراءه مفردة صغيرة عارية. أعلن هو كينج هذه النتيجة لي ولبريسكيل على انفراد، بعد أيام قليلة من اكتشافه لها، في حفل عشاء في منزل بريسكيل. ومع ذلك، عندما ضغطنا عليه أنا وبريسكيل للفوز برهاننا، رفض لأسباب علمية. وأصر على أن صياغة رهاننا كانت واضحة للغاية: الرهان يقتصر على المفردات العارية التي يخضع تكوينها لقوانين الفيزياء الكلاسيكية (أي ليست الكمومية)، بما في ذلك قوانين النسبية العامة. ومع ذلك، فإن تبخر الثقوب السوداء هو ظاهرة تخضع للميكانيكا الكمومية ولا تحكمها قوانين النسبية العامة الكلاسيكية، بل قوانين المجالات الكمومية في الزمكان المنحني، لذا فإن أي مفردة عارية قد تنتج عن تبخر الثقب الأسود ستكون خارج عالم رهاننا، أصر هو كينج (بشكل صحيح). ومع ذلك، فإن المفردة العارية، مهما كان شكلها، ستكون بالتأكيد بمثابة ضربة لكنيسة الفيزياء!

ورغم أننا نستمتع برهاناتنا، فإن القضايا التي نناقشها خطيرة للغاية. إذا كان من الممكن وجود المفردات العارية، فإن قوانين الجاذبية الكمومية غير المفهومة هي وحدها القادرة على إخبارنا كيف تتصرف، وما قد تفعله بالزمكان في محيطها، وما إذا كانت أفعالها ذات تأثير كبير ممكن على الكون الذي نعيش فيه، أو تأثير صغير فقط. نظرًا لأن المفردة العارية، إذا كانت موجودة، قد تؤثر بقوة على كوننا، فإننا نريد بشدة أن نفهم ما إذا كانت الرقابة الكونية صحيحة، وما تنتبأ به قوانين الجاذبية الكمومية لسلوكيات المفردة. إن النضال من أجل معرفة ذلك لن يكون سريعًا أو سهلاً.

مكتبة
t.me/soramnqraa

1. في المصطلحات العلمية، نقول إن المفردة «شبيهة بالمكان».
2. 10^{-43} ثانية هو زمن بلانك-ويلر. يمكن الحصول عليها (تقريبًا) من خلال الصيغة $\sqrt{G\hbar/c^3}$ ، حيث $G = 6.670 \times 10^{-8}$ داین سنتیمتر² / جرام 2 هو ثابت جاذبية نيوتن، $\hbar = 1.055 \times 10^{-27}$ إرج. ثانية هو ثابت الميكانيكا الكمومية لبلانك، و $c = 2.998 \times 10^{10}$ سنتیمتر/ثانية هي سرعة الضوء. لاحظ أن زمن بلانك-ويلر يساوي الجذر التربيعي لمساحة بلانك-ويلر (الفصل الثاني عشر) مقسومًا على سرعة الضوء.
3. يعتمد الوصف أعلاه على منهج ويلر-ديويت وهوكينج-هارتل في صياغة قوانين الجاذبية الكمومية. وعلى الرغم من أن نهجهم ليس سوى واحد من الأساليب العديدة التي تتبع الآن، فإنه النهج الذي سأعطيه احتمالات جيدة للنجاح.

الفصل الرابع عشر: الثقوب الدودية وآلات الزمن

وفيه يسعى المؤلف إلى التبصر بالقوانين الفيزيائية عن طريق طرح:
هل يمكن للحضارات المتقدمة للغاية بناء الثقوب الدودية من خلال
المكان الفائق للسفر السريع بين - النجوم وآلات للسفر عبر الزمن إلى
الماضي؟

الثقوب الدودية والمواد الغريبة

بينما أنهيت للتو تدريس فصلي الأخير في العام الدراسي 1984-1985 وأجلس
على كرسي مكتبي لأدع الأدرينالين يهدأ، رن الهاتف. كان كارل ساجان، عالم الفيزياء
الفلكية بجامعة كورنيل وصديقي المقرب منذ زمن بعيد. قال: «آسف لإزعاجك يا كيب،
لكنني على وشك الانتهاء من رواية عن أول اتصال للجنس البشري بحضارة خارج
كوكب الأرض، وأنا قلق. أريد أن يكون العلم دقيقاً قدر الإمكان، وأخشى أن أكون
قد أخطأت في بعض من فيزياء الجاذبية. هل تراجعها لي وتعطيني النصيحة؟». بالطبع
سأفعل. سيكون الأمر مثيراً، لأن كارل رجل ذكي. قد يكون الأمر ممتعاً. بالإضافة إلى
ذلك، كيف يمكنني رفض طلب من هذا النوع لصديق؟

وصلت الرواية بعد بضعة أسابيع، وهي عبارة عن كومة من الحروف المطبوعة مزدوجة
المسافات يبلغ سمكها ثلاث بوصات ونصف.

وضعت الكومة في حقيبة ليلية وألقيت الحقيبة في المقعد الخلفي في سيارة ليندا
البرونكو، عندما اصطحبتي في رحلة طويلة من باسادينا إلى سانتا كروز. ليندا هي
زوجتي السابقة. كنا أنا وهي وابنتا بريت في طريقنا لرؤية ابنتنا كاريس تتخرج في الكلية.
بينما ليندا وبريت يتناوبان على القيادة، كنت أقرأ وأفكر. (ليندا وبريت معتادين على
مثل هذه الحالات من الانطواء؛ فقد عاشا معي لسنوات عديدة). كانت الرواية ممتعة،

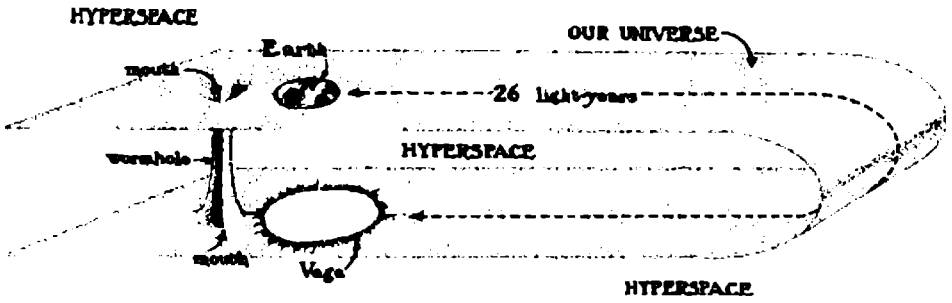
لكن كارل الآن في ورطة بالفعل. جعل بطلته، إيلانور أرواي، تغوص في ثقب أسود بالقرب من الأرض، وتسافر عبر الفضاء الفائق بالطريقة الموضحة في الشكل 13.4، ثم تخرج بعد ساعة بالقرب من النجم فيجا، الذي يبعد 26 سنة ضوئية. كارل ليس خبيراً في النسبية، ولم يكن على دراية برسالة حسابات التقلبات: من المستحيل السفر عبر المكان الفائق من قلب الثقب الأسود إلى جزء آخر من كوننا. يتعرض أي ثقب أسود باستمرار للقصف بواسطة تقلبات فراغ كهرومغناطيسية صغيرة وكميات ضئيلة من الإشعاع. عندما تسقط هذه التقلبات والإشعاعات داخل الثقب، فإنها تتسارع بفعل جاذبية الثقب إلى طاقة هائلة، ثم تمطر بانفجار على أي «كون صغير مغلق» أو «نفق» أو أي وسيلة نقل (مركبة) أخرى قد يحاول المرء من خلالها إطلاق الرحلة عبر المكان الفائق. وكانت الحسابات لا تقبل الجدل. تدمر أي مركبة للسفر عبر المكان الفائق بسبب «المطر» المتفجر قبل بدء الرحلة. لا بد من إحداث تغيير في رواية كارل.

في أثناء رحلة العودة من سانتا كروز، في مكان ما غرب فريسنو على الطريق السريع رقم 5، خطرت ببالي فكرة. ربما يستطيع كارل استبدال ثقب دودي بثقبه الأسود عبر المكان الفائق.

الثقب الدودي هو اختصار افتراضي للسفر بين نقاط بعيدة في الكون. للثقب الدودي مدخلان يطلق عليهما «الفَمَّين»، أحدهما (على سبيل المثال) قريب من الأرض، والآخر (على سبيل المثال) في مدار حول فيجا، على بُعد 26 سنة ضوئية. يرتبط الفَمَّان ببعضهما عن طريق نفق عبر المكان الفائق (الثقب الدودي) قد يصل طوله إلى كيلومتر واحد فقط. إذا دخلنا الفم القريب من الأرض، فإننا نجد أنفسنا في النفق. ومن خلال السفر لمسافة كيلومتر واحد فقط أسفل النفق، نصل إلى المصب الآخر ونظهر بالقرب من فيجا، على بُعد 26 سنة ضوئية كما قيس في الكون الخارجي.

ويصور الشكل 14.1 مثل هذا الثقب الدودي في مخطط التضمين. هذا المخطط، كما هو معتاد في تضمين المخططات، يُظهر كوننا مثاليًا على أنه يحتوي على بُعدين مكانيين فقط بدلاً من ثلاثة (انظر الشكلين 3.2 و 3.3). في الرسم البياني، يصور الفضاء/المكان الكوني على شكل ورقة ثنائية الأبعاد. تمامًا كالنملة التي ترحف على ورقة لا تدرك ما إذا كانت الورقة مسطحة أم مطوية بلطف، كذلك نحن في كوننا غافلون عما إذا كان كوننا ممددًا في المكان الفائق أو مطويًا بلطف، كما هو موضح في الشكل التوضيحي. ومع

ذلك، فإن الطية اللطيفة مهمة؛ فهي تسمح للأرض وفيجا بأن يكونا بالقرب من بعضهما في المكان الفائق حتى يمكن توصيلهما عن طريق الثقب الدودي القصير. مع وجود الثقب الدودي في مكانه، فإننا، كالنملة أو الدودة التي ترحف على سطح مخطط التضمين، لدينا طريقان محتملان من الأرض إلى فيجا: الطريق الطويل الذي يبلغ طوله 26 سنة ضوئية عبر الكون الخارجي، والطريق القصير الذي يبلغ طوله كيلومترًا واحدًا. الطريق عبر الثقب الدودي.



14.1 ثقب دودي بطول كيلومتر عبر المكان الفائق يربط الأرض بالمنطقة المجاورة لفيجا، على بُعد 26 سنة ضوئية. (غير مرسومة بمقياس رسم صحيح).

كيف سيكون شكل فم الثقب الدودي لو كان على الأرض أمامنا؟ في الكون ثنائي الأبعاد في الرسم التخطيطي، يرسم فم الثقب الدودي على شكل دائرة؛ لذلك، في كوننا ثلاثي الأبعاد سيكون مقارنة ثلاثية الأبعاد للدائرة. في الواقع، سيبدو الفم مثل الأفق الكروي لثقب أسود غير دوار، مع استثناء رئيسي واحد: الأفق عبارة عن سطح ذي «طريق باتجاه واحد بلا عودة». يمكن لأي شيء أن يدخل، لكن لا شيء يمكن أن يخرج. على النقيض من ذلك، فإن فم الثقب الدودي هو سطح ذو اتجاهين، يمكننا عبوره في كلا الاتجاهين، إلى الداخل عبر الثقب الدودي، والعودة إلى الخارج إلى الكون الخارجي. بالنظر إلى الفم الكروي، يمكننا رؤية الضوء القادم من فيجا؛ لقد دخل الضوء إلى الفم الآخر بالقرب من فيجا وسافر عبر الثقب الدودي - كما لو أن الثقب الدودي عبارة عن أنبوب ضوئي أو ألياف بصرية - إلى الفم القريب من الأرض، حيث يظهر الآن ويضرب أبصارنا.

الثقوب الدودية ليست مجرد نسج من خيال كاتب الخيال العلمي. اكتشفها لودفيج فلام رياضياً، كحل لمعادلة أينشتاين للمجال، في عام 1916، بعد بضعة أشهر فقط

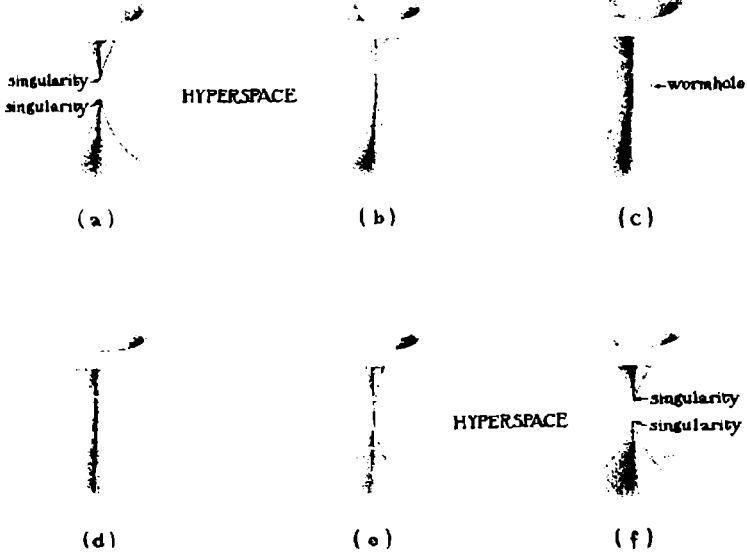
من صياغة أينشتاين لمعادلته؛ لقد اكتشفها أينشتاين وناثان روزن في ثلاثينيات القرن العشرين؛ ودرسها جون ويلر وفريقه البحثي على نطاق واسع، من خلال مجموعة متنوعة من الحسابات الرياضية، في الخمسينيات من القرن العشرين. ومع ذلك، لم تكن أي من الثقوب الدودية التي عثر عليها كحلول لمعادلة أينشتاين - قبل رحلتي إلى الطريق السريع رقم 5 في عام 1985 مناسبة لرواية كارل ساجان، لأنه لا يمكن العبور خلالها بأمان. كان من المتوقع أن يتطور كل واحد منها مع مرور الزمن بطريقة غريبة جداً: ينشأ الثقب الدودي في لحظة ما من الزمن، ويفتح لفترة وجيزة، ثم ينفصل ويختفي - وإجمالي عمره من الخلق إلى الانقباض قصير جداً بحيث لا يمكن لأي شيء على الإطلاق (لا شخص، ولا إشعاع، ولا إشارة من أي نوع) أن ينتقل عبره، من فم إلى آخر. أي شيء يحاول سيقبض عليه ويدمره انقباض الثقب الدودي. ويبين الشكل 14.2 مثالاً بسيطاً.

مثل معظم زملائي الفيزيائيين، كنت متشككاً بشأن الثقوب الدودية لعقود من الزمن. لا تتنبأ معادلة أينشتاين للمجال بأن الثقوب الدودية تعيش حياة قصيرة إذا تُركت لأجهزتها الذاتية فحسب؛ تصبح حياتها أقصر بسبب سقوط أجزاء عشوائية من الإشعاع: يتسارع الإشعاع (وفقاً لحسابات دوج إياردلي وإيان ريدمانوت) إلى طاقة عالية جداً بسبب جاذبية الثقب الدودي، وعندما يقصف الإشعاع المنشط حنجرة الثقب الدودي، فإن الحلقة ينكمش بسرعة عالية وينكمش بشكل أسرع بكثير مما قد يحدث بطريقة أخرى - سريع جداً، في الواقع، لدرجة أن الثقب الدودي يكاد لا يكون لديه أي حياة على الإطلاق.

هناك سبب آخر للتشكيك. في حين أن الثقوب السوداء هي نتيجة حتمية للتطور النجمي (النجوم الضخمة التي تدور ببطء، من ذلك النوع الذي يراه علماء الفلك بكثرة في مجرتنا، سوف تنفجر لتشكل ثقوباً سوداء عندما تموت)، فلا توجد طريقة طبيعية مماثلة لنشوء الثقب الدودي المرغوب. في الواقع، لا يوجد سبب على الإطلاق للاعتقاد بأن كوننا يحتوي اليوم على أي مفردات من النوع الذي يؤدي إلى نشوء الثقوب الدودية (الشكل 14.2)؛ وحتى لو كانت مثل هذه المفردات موجودة بالفعل، فمن الصعب أن نفهم كيف يمكن لاثنتين منها أن تجدا بعضهما في الامتدادات الشاسعة للمكان الفائق، وذلك لإنشاء ثقب دودي بالطريقة الموضحة في الشكل 14.2.

عندما يحتاج أحد الأصدقاء إلى المساعدة، يكون المرء على استعداد للتوجه إلى أي مكان يمكن العثور فيه على المساعدة. ويبدو أن الثقوب الدودية - على الرغم من شكوكي بشأنها -

هي المساعدة الوحيدة التي تلوح في الأفق. ربما، خطر لي على الطريق السريع 5 في مكان ما غرب فريسنو، أن هناك طريقة ما يمكن لحضارة بلا حدود لتقدمها أن تُبقي الثقب الدودي مفتوحًا؛ أي تمنعه من الانغلاق، حتى تتمكن إلينور أرواي من السفر عبره من الأرض إلى فيجا ثم العودة. أخرجت قلمًا وورقة وبدأت في الحساب. (لحسن الحظ، الطريق السريع 5 مستقيم جدًا؛ يمكنني إجراء العمليات الحسابية من دون أن أُصاب بدوار السيارة).



14.2 تطور ثقب دودي كروي بدقة لا يحتوي على أي مادة في داخله. (اكتُشف هذا التطور كحل لمعادلة أينشتاين للمجال في منتصف الخمسينيات من قِبل مارتن كرسال، زميل ويلر الشاب في جامعة برينستون). في البداية (a) لم يكن هناك ثقب دودي؛ وبدلاً من ذلك هناك مفردة بالقرب من الأرض وواحدة بالقرب من فيجا. ثم، في لحظة ما من الزمن (b)، تمتد المفردتان عبر المكان الفائق، وتجدان بعضهما، وتبدان بعضهما، وفي الإبادة تخلقان الثقب الدودي. ينمو الثقب الدودي في محيط (c)، ثم يبدأ في الانكماش (d)، ثم ينضغط (e)، مما يخلق مفردتين (f) مشابھتين لتلك التي ولد فيها الثقب الدودي، ولكن مع استثناء واحد مهم. كل مفردة ابتدائية (a) تشبه مفردة الانفجار الأعظم؛ يتدفق الزمن منها، لذلك يمكن أن يولد شيء ما: الكون في حالة الانفجار العظيم، والثقب الدودي في هذه الحالة. وعلى النقيض من ذلك، فإن كل مفردة نهائية (f) تشبه مفردة الانسحاق العظيم (الفصل الثالث عشر)؛ يتدفق الزمن منه، فتدمر الأشياء فيه: الكون في حالة الانسحاق الكبير، والثقب الدودي في هذه الحالة. أي شيء يحاول العبور عبر الثقب الدودي خلال حياته القصيرة، يُحتَجَز في القرص، ويُدمَر، بالإضافة إلى الثقب الدودي نفسه، في المفردة النهائية (f).

ولجعل الحسابات سهلة، أضفت المثالية على الثقب الدودي باعتباره كرويًا تمامًا (لذلك في الشكل 14.1، حيث يقمع أحد أبعاد كوننا الثلاثة، يكون دائريًا تمامًا في المقطع العرضي). ومن ثم، ومن خلال صفحتين من الحسابات المستندة إلى معادلة أينشتاين للمجال، اكتشفت ثلاثة أشياء:

أولاً، الطريقة الوحيدة لإبقاء الثقب الدودي مفتوحًا هي ربط الثقب الدودي بنوع من المواد التي تدفع جدران الثقب الدودي بعيدًا عن بعضها، بفعل الجاذبية. أنا أسمى هذه المادة الغريبة لأنها - كما سنرى - مختلفة تمامًا عن أي مادة التقى بها الإنسان على الإطلاق.

ثانيًا، اكتشفت أنه كما يجب على المادة الغريبة المطلوبة أن تدفع جدران الثقب الدودي إلى الخارج، كذلك أيضًا، كلما مر شعاع من الضوء عبر المادة، ستدفع المادة بقوة الجاذبية إلى الخارج أشعة الضوء، مما يؤدي إلى إبعادها عن بعضها. وبعبارة أخرى، فإن المادة الغريبة سوف تتصرف مثل «إزالة عدسة التركيز البؤري»؛ فإنها ستلغي تركيز شعاع الضوء بفعل الجاذبية. انظر الإطار 14.1.

ثالثًا، تعلمت من معادلة مجال أينشتاين أنه من أجل إزالة تركيز أشعة الضوء عن طريق الجاذبية ودفع جدران الثقب الدودي بعيدًا عن بعضها، يجب أن يكون للمادة الغريبة التي تربط الثقب الدودي كثافة طاقة متوسطة سالبة، كما يراها شعاع الضوء الذي يمر عبرها. وهذا يتطلب قليلًا من التوضيح. تذكر أن الجاذبية (انحناء الزمكان) تنتج عن الكتلة (الإطار 2.6) وأن الكتلة والطاقة متكافئتان (الإطار 5.2، حيث يتجسد التكافؤ في معادلة أينشتاين الشهيرة $E = Mc^2$ وهذا يعني أنه يمكن اعتبار الجاذبية ناتجة عن الطاقة. الآن، خذ كثافة طاقة المادة الموجودة داخل الثقب الدودي (طاقاتها لكل سنتيمتر مكعب)، كما قاستها سرعة شعاع الضوء - ما يعني، كما قاسها شخص يسافر عبر الثقب الدودي بسرعة (تقريبًا) الضوء - ومتوسط كثافة تلك الطاقة على طول مسار شعاع الضوء. يجب أن يكون متوسط كثافة الطاقة الناتجة سالبًا حتى تتمكن المادة من إزالة تركيز شعاع الضوء وإبقاء الثقب الدودي مفتوحًا؛ أي حتى تكون مادة الثقب الدودي «غريبة»³.

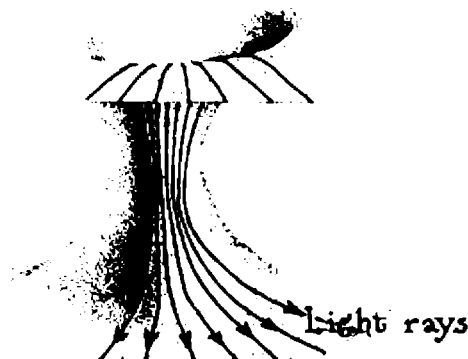
هذا لا يعني بالضرورة أن المادة الغريبة لديها طاقة سلبية مقيسة بواسطة شخص ما في حالة سكون داخل الثقب الدودي. كثافة الطاقة مفهوم نسبي، وليس مطلقًا؛ في أحد

الإطارات المرجعية قد يكون سلبياً، وفي إطار مرجعي آخر قد يكون إيجابياً. يمكن أن تحتوي المادة الغريبة على كثافة طاقة سلبية كما قيست في الإطار المرجعي لشعاع الضوء الذي ينتقل عبرها، ولكن تحتوي على كثافة طاقة موجبة كما قيست في الإطار المرجعي للثقب الدودي. ومع ذلك، نظراً لأن جميع أشكال المادة التي واجهناها نحن البشر حتى الآن تقريباً لها متوسط كثافة طاقة موجبة في الإطار المرجعي للجميع، فقد اشتبه الفيزيائيون منذ فترة طويلة في انعدام إمكانية وجود المواد الغريبة. من المفترض أن قوانين الفيزياء تحظر المواد الغريبة، كما خمنّا نحن الفيزيائيون، ولكن كيف يمكن لقوانين الفيزياء أن تفعل ذلك ما لم تكن واضحة على الإطلاق؟

14.1 الإطار

الإبقاء على الثقب الدودي مفتوحاً، مادة غريبة

أي ثقب دودي كروي يمكن أن ينتقل من خلاله شعاع الضوء سوف يؤدي إلى إلغاء تركيز شعاع الضوء. ولرؤية ذلك، تخيل (كما هو موضح أدناه) أن الشعاع مرسل عبر عدسة مقاربة قبل أن يدخل الثقب الدودي، مما يجعل جميع أشعتها تتقارب بشكل قطري نحو مركز الثقب الدودي. ومن ثم تستمر الأشعة دائماً في السفر بشكل قطري (كيف يمكن أن تتحرك بطريقة أخرى أساساً؟)، مما يعني أنها عندما تخرج من الفم الآخر، فإنها تتباعد بشكل قطري إلى الخارج، بعيداً عن مركز الثقب الدودي، كما هو موضح. لقد أُلغي تبئير الشعاع.



ينتج انحناء الزمكان في الثقب الدودي، والذي يسبب انعدام التبثير، بواسطة المواد «الغريبة» التي تمر عبر الثقب الدودي وتُبقى الثقب الدودي مفتوحًا. وبما أن انحناء الزمكان يعادل الجاذبية، فإن جاذبية المادة الغريبة هي في الواقع التي تعمل على إزالة تركيز شعاع الضوء. وبعبارة أخرى، فإن المادة الغريبة تطرد أشعة الضوء بفعل الجاذبية، مما يدفعها بعيدًا عن نفسها وبالتالي بعيدًا عن بعضها، وبالتالي تزيل تبثيرها.

وهذا هو بالضبط عكس ما يحدث في عدسة الجاذبية (الشكل 8.2). تركز جاذبية نجم أو مجرة أو ثقب أسود متداخل الضوء القادم من نجم بعيد؛ أما هنا فتلغي تبثير الضوء.

ربما يكون تحيزنا ضد وجود المواد الغريبة خاطئًا، فكرت في نفسي في حين أقود سيارتي على الطريق السريع رقم 5. ربما تكون المواد الغريبة موجودة. هذه هي الطريقة الوحيدة التي يمكنني بها مساعدة كارل. لذلك عند وصولي إلى باسادينا، كتبت لكارل رسالة طويلة، أشرح فيها لماذا لن تتمكن بطلته من استخدام الثقوب السوداء للسفر السريع بين-النجوم، واقرحت عليه استخدام الثقوب الدودية بدلًا من ذلك، وأن يكتشف شخص ما في الرواية أن المواد الغريبة يمكن أن توجد بالفعل ويمكن أن تستخدم لإبقاء الثقوب الدودية مفتوحة. قَبِلَ كارل اقتراحي بكل سرور وأدرجه في النسخة النهائية من روايته *Contact*⁴.

خطر لي، بعد أن عرضت تعليقاتي على كارل ساجان، أن روايته يمكن أن تكون بمثابة أداة تعليمية للطلاب الذين يدرسون النسبية العامة. ولمساعدة هؤلاء الطلاب، خلال خريف عام 1985، بدأت أنا ومايك موريس (أحد طلابي) في كتابة بحث حول معادلات النسبية العامة للثقوب الدودية المدعومة بمواد غريبة، وارتباط تلك المعادلات برواية ساجان.

لقد كتبنا ببطء. وكانت المشاريع الأخرى أكثر إلحاحًا وحصلت على أولوية أعلى. بحلول شتاء 1987-1988، كنا قد قدمنا ورقتنا البحثية إلى المجلة الأمريكية للفيزياء، لكنها لم تُنشر بعد؛ وموريس يقترب من نهاية تدريب درجة الدكتوراه لشغل وظائف ما بعد الدكتوراه. مع استمارات التقديم، أرفق موريس مخطوطة ورقتنا. تلقى دون بايج (أستاذ في جامعة ولاية بنسلفانيا وطالب سابق لي ولهوكينج) الطلب، وقرأ مخطوطتنا، وأرسل رسالة إلى موريس.

«عزيزي مايك... ويترتب على ذلك مباشرة من الاقتراح 9.2.8 من كتاب هوكينج وإليس، بالإضافة إلى معادلات مجال أينشتاين، أن أي ثقب دودي [يتطلب مادة غريبة لإبقائه مفتوحًا]... مع خالص التقدير، دون ن. بايج».

كم شعرت بالغباء! لم يسبق لي أن درست الأساليب العالمية (موضوع كتاب هوكينج وإليس) بأي قدر من العمق، وكنت الآن أدفع الثمن. لقد استنتجت وأنا على الطريق السريع رقم 5، بجهد متواضع، أنه لكي يفتح ثقب دودي كروي بدقة، يجب على المرء أن يربطه بمادة غريبة. ومع ذلك، الآن، باستخدام الأساليب العالمية وبجهد أقل، استنتج بايج أنه من أجل إبقاء أي ثقب دودي مفتوحًا (ثقب دودي كروي، ثقب دودي مكعب، ثقب دودي به تشوهات عشوائية)، يجب على المرء أن يربطه بمادة غريبة. علمت لاحقًا أن دينيس جانون وس. و. لبي توصلوا إلى نفس النتيجة تقريبًا في عام 1975.

أدى هذا الاكتشاف، وهو أن جميع الثقوب الدودية تحتاج إلى مواد غريبة لإبقائها مفتوحة، إلى إطلاق الكثير من الأبحاث النظرية خلال الفترة من 1988 إلى 1992. «هل تسمح قوانين الفيزياء بوجود مواد غريبة، ولو كان الأمر كذلك، تحت أي ظرف؟» وكانت هذه هي القضية المركزية.

لقد قدم مفتاح الإجابة بالفعل في السبعينيات ستيفن هوكينج. في عام 1970، عند إثبات أن المساحات السطحية للثقوب السوداء تتزايد دائمًا (الفصل الثاني عشر)، كان على هوكينج أن يفترض أنه لا توجد مادة غريبة بالقرب من أفق أي ثقب أسود. إذا كانت هناك مواد غريبة في محيط الأفق، فإن برهان هوكينج سيفشل، وستفشل نظريته، وقد تنكمش مساحة سطح الأفق. ومع ذلك، لم يقلق هوكينج كثيرًا بشأن هذا الاحتمال؛ لقد بدا في عام 1970 رهانًا آمنًا إلى حد ما على أن المواد الغريبة لا يمكن أن توجد.

ثم، في عام 1974، جاءت مفاجأة كبيرة: استنتج هوكينج، كمنتج ثانوي لاكتشافه تبخر الثقوب الأسود (الفصل الثاني عشر)، أن تقلبات الفراغ بالقرب من أفق الثقب غريبة: فهي تتمتع بمتوسط كثافة طاقة سالبة كما يُرى من خلال حزم الضوء الصادر بالقرب من أفق الثقب. في الواقع، هذه الخاصية الغريبة لتقلبات الفراغ هي التي تسمح لأفق الثقب بالانكماش مع تبخر الثقب، وهو ما يعد انتهاكًا لنظرية هوكينج لزيادة المساحة. ونظرًا لأن المواد الغريبة مهمة جدًا للفيزياء، فسوف أشرح ذلك بمزيد من التفصيل:

تذكر أصل وطبيعة تقلبات الفراغ، كما ناقشناها في المربع 12.4: عندما يحاول المرء إزالة جميع المجالات الكهربائية والمغناطيسية من منطقة ما في الفضاء؛ أي عندما يحاول المرء إنشاء فراغ مثالي، تظل هناك دائمًا وفرة من العشوائية، تذبذبات كهرومغناطيسية غير متوقعة ناجمة عن لعبة شد الحبل بين المجالات في المناطق المتجاورة من المكان/الفضاء. المجالات «هنا» تستعير الطاقة من المجالات «هناك»، تاركة المجالات هناك بعجز في الطاقة؛ أي تتركها مؤقتًا بطاقة سلبية. ثم تستعيد المجالات هناك الطاقة بسرعة ومعها القليل من الفائض، مما يدفع طاقتها إلى الإيجابية مؤقتًا، وهكذا تستمر وتستمر وتستمر.

في الظروف العادية على الأرض، يكون متوسط طاقة تقلبات الفراغ هذه صفرًا. إنها تقضي فترات متساوية من الزمن مع نقص الطاقة وتجاوزها، ويختفي متوسط العجز والفائض. ليس قريبًا جدًا من أفق الثقب الأسود المتبخر، كما أشارت حسابات هوكينج عام 1974. بالقرب من الأفق، يجب أن يكون متوسط الطاقة سالبًا، على الأقل عند قياسه بواسطة أشعة الضوء، مما يعني أن تقلبات الفراغ غريبة.

لم تُستنتج كيفية حدوث ذلك بالتفصيل حتى أوائل الثمانينيات، عندما استخدم دون بايج من جامعة ولاية بنسلفانيا، وفيليب كانديلاس من أكسفورد، والعديد من الفيزيائيين الآخرين قوانين المجالات الكمومية في الزمكان المنحني لاستكشاف، بتفصيل كبير، تأثير أفق الثقب على تقلبات الفراغ. ووجدوا أن تأثير الأفق هو المفتاح. يشوه الأفق تقلبات الفراغ بشكل أبعد كثيرًا من تلك التي قد تكون على الأرض، وبهذا التشويه يجعل متوسط كثافة الطاقة سالبًا؛ أي يجعل التقلبات غريبة.

تحت أي ظروف أخرى ستكون تقلبات الفراغ غريبة؟ هل يمكن أن تكون غريبة داخل الثقب الدودي، وبالتالي تُبقي الثقب مفتوحًا؟ كان هذا هو الدافع الرئيسي للجهود البحثية التي أثارها ملاحظة بايج أن الطريقة الوحيدة لإبقاء أي ثقب دودي مفتوحًا هي باستخدام مواد غريبة.

الجواب لم يأت بسهولة، وليس في متناول اليد تمامًا. أثبت جونار كلينكهامر (أحد طلابي) أنه في الزمكان المسطح؛ أي بعيدًا عن كل أجسام الجاذبية، لا يمكن أن تكون تقلبات الفراغ غريبة أبدًا - فلا يمكن أبدًا أن يكون لها متوسط كثافة طاقة سالب إذا قيست

بواسطة أشعة الضوء. من ناحية أخرى، أثبت روبرت والد (طالب سابق لدى ويلر) وأولفي يورتسيفير (طالب سابق لي) أنه في الزمكان المنحني، في ظل مجموعة واسعة جدًا من الظروف، يشوه الانحناء تقلبات الفراغ وبالتالي يجعلها غريبة.

هل الثقب الدودي هو الذي ينغلق مخلفًا مثل هذه العواقب؟ هل يمكن لانحناء الثقب الدودي -من خلال تشويه تقلبات الفراغ- أن يجعلها غريبة وأن يمكنها من إبقاء الثقب الدودي مفتوحًا؟ في حين أننا حتى وقت طباعة هذا الكتاب ما زلنا لا نعرف.

في أوائل عام 1988، بينما كانت الدراسات النظرية للمواد الغريبة جارية، بدأت أدرك قوة نوع البحث الذي أثارته مكالمة كارل ساجان الهاتفية. تمامًا كما أنه من بين جميع تجارب الفيزياء الحقيقية التي قد يقوم بها التجريبيين، فإن التجارب التي من المرجح أن تسفر عن رؤى جديدة عميقة حول قوانين الفيزياء هي تلك التي تدفع القوانين الأصعب، وبالمثل، من بين جميع التجارب الفكرية التي قد يدرسها المنظرون، عندما تكون القوانين محل البحث خارج نطاق التكنولوجيا الحديثة، فإن تلك التي من المرجح أن تسفر عن رؤى جديدة عميقة هي تلك التي تدفع بقوة أكبر. ولا يوجد أي نوع من التجارب الفكرية يدفع قوانين الفيزياء بقوة أكبر من ذلك النوع الذي أثارته المكالمة الهاتفية التي أجراها كارل ساجان معي -التجارب الفكرية التي تطرح السؤال التالي: «ما الأشياء التي تسمح لقوانين الفيزياء لحضارة لا حدود لتقدمها بالقيام بها، وما الأشياء التي تمنعها القوانين؟» (أعني بعبارة «حضارة بلا حدود لتقدمها» تلك التي تحجم أنشطتها قوانين الفيزياء، وليس على الإطلاق بسبب عدم الكفاءة، أو الافتقار إلى المعرفة، أو أي شيء آخر).

أعتقد أننا نحن الفيزيائيين نميل إلى تجنب مثل هذه الأسئلة لأنها قريبة جدًا من الخيال العلمي. في حين أن الكثير منا قد يستمتع بقراءة قصص الخيال العلمي أو حتى كتابة بعضها، فإننا نخشى السخرية من زملائنا بسبب عملنا في أبحاث قريبة من هامش الخيال العلمي. ولذلك فإننا نميل إلى التركيز على نوعين آخرين من الأسئلة الأقل ثورية: «ما أنواع الأشياء التي تحدث بشكل طبيعي في الكون؟» (على سبيل المثال، هل تحدث الثقوب السوداء بشكل طبيعي؟ وهل تحدث الثقوب الدودية بشكل طبيعي؟). و«ما أنواع الأشياء التي يمكننا كبشر، من خلال التكنولوجيا الحالية أو المستقبلية القريبة، أن نفعلها؟» (على سبيل المثال، هل يمكننا إنتاج عناصر جديدة مثل البلوتونيوم واستخدامها لصنع قنابل ذرية؟ وهل يمكننا إنتاج موصلات فائقة ذات حرارة عالية واستخدامها لخفض فواتير

الطاقة للقطارات المرفوعة والمصادمات الفائقة ذات المغناطيسات فائقة التوصيل؟).

بحلول عام 1988، بدالي واضحاً أننا نحن الفيزيائيين كنا محافظين للغاية في أسئلتنا. وبالفعل، بدأ أحد الأسئلة من نوع ساجان (كما سأسميه) في مكافأتنا. من خلال طرح السؤال التالي: «هل يمكن لحضارة لا حدود لتقدمها أن تحافظ على ثقب دودية للسفر السريع بين النجوم؟». لقد حددت أنا وموريس المواد الغريبة باعتبارها المفتاح لصيانة الثقب الدودي، وبذلنا جهداً مشمراً إلى حد ما لفهم الظروف التي بناءً عليها قد تسمح قوانين الفيزياء بوجود المواد الغريبة أو لا تسمح.

لنفترض أن كوننا قد خُلق (في الانفجار الكبير) من دون وجود ثقب دودية على الإطلاق. ثم بعد دهور، عندما تطورت الحياة الذكية وأنتجت حضارة (افتراضية) متقدمة بلا حدود، هل تستطيع تلك الحضارة المتقدمة بلا حدود بناء ثقب دودية للسفر السريع بين النجوم؟ هل تسمح قوانين الفيزياء ببناء الثقب الدودية في أماكن لم تكن موجودة من قبل؟ هل تسمح القوانين بهذا النوع من التغيير في طوبولوجيا فضاء كوننا؟

هذه الأسئلة هي النصف الثاني من مشكلة التنقل بين-النجوم التي طرحها كارل ساجان. النصف الأول، صيانة الثقب الدودي بمجرد بنائه، لقد وجد ساجان الحل بمساعدة المادة الغريبة. الجزء الثاني أتقنه. في روايته، يصف الثقب الدودي الذي سافرت من خلاله إليانور أرواي بأنه محفوظ الآن بواسطة مادة غريبة، ولكن حضارة لا حدود لتقدمها قد أنشأته في الماضي البعيد، والتي فقدنا كل أثرها.

نحن الفيزيائيون بالطبع، لسنا سعداء بإحالة عملية إنشاء الثقب الدودية إلى مرحلة ما قبل التاريخ. نريد أن نعرف ما إذا كان من الممكن تغيير طوبولوجيا الكون الآن، وكيف ذلك، ضمن حدود القانون الفيزيائي.

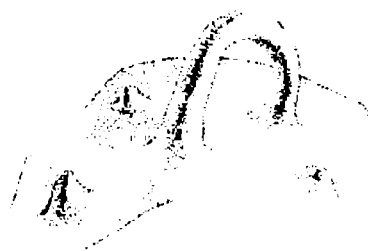
يمكننا أن نتخيل استراتيجيتين لبناء ثقب دودي حيث لم يكن هناك شيء من قبل: استراتيجية كمومية، واستراتيجية كلاسيكية.

تعتمد الاستراتيجية الكمومية على تقلبات الفراغ بفعل الجاذبية (الإطار 4.12)؛ أي المقاربة من وجهة نظر الجاذبية لتقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي التي ناقشناها أعلاه: التقلبات العشوائية الاحتمالية في انحناء الفضاء الناجمة عن لعبة شد الحبل التي تحدث في مناطق متجاورة من الفضاء/ المكان. يسرقون الطاقة من بعضهم باستمرار ثم يعيدونها.

يُعتقد أن تقلبات فراغ الجاذبية موجودة في كل مكان، لكنها في الظروف العادية تكون صغيرة جدًا لدرجة أنه لم يتمكن أي تجريبي من اكتشافها على الإطلاق.

مثلما تصبح حركات الانتكاس العشوائي للإلكترون أكثر قوة عندما يحصر المرء الإلكترون في منطقة أصغر فأصغر (الفصل الرابع)، كذلك تكون تقلبات فراغ الجاذبية أكثر قوة في المناطق الصغيرة منها عن المناطق الكبيرة؛ أي بالنسبة إلى الأطوال الموجية الصغيرة وليس للأطوال الموجية الكبيرة. في عام 1955، استنتج جون ويلر، من خلال الجمع بين قوانين الميكانيكا الكمومية وقوانين النسبية العامة بطريقة أولية وبسيطة، أنه في مساحة بحجم طول بلانك-ويلر، 1.62×10^{-33} سنتيمتر أو أصغر، تقلبات الفراغ ضخمة جدًا لدرجة أن الفضاء كما نعرفه «يغلي» ويصبح زبدًا من الرغوة الكمومية - نفس النوع من الرغوة الكمومية التي تشكّل جوهر المفردة الزمكاني (الفصل الثالث عشر؛ الشكل 14.3).

وبالتالي فإن الرغوة الكمومية موجودة في كل مكان: داخل الثقوب السوداء، وفي الفضاء بين النجوم، وفي الغرفة التي تجلس فيها، وفي دماغك. لكن لرؤية الرغوة الكمومية، يجب على المرء أن يُكبّر الصورة باستخدام مجهر فائق (افتراضي)، للنظر إلى الفضاء ومحتوياته بمقاييس أصغر فأصغر. يتعين على المرء التكبير من مقياسنا أنا وأنت (مئات السنتيمترات) إلى مقياس الذرة (10^{-8} سنتيمتر)، إلى مقياس النواة الذرية (10^{-13} سنتيمتر)، ثم إلى المقياس الأقل بمقدار عشرين جزءًا عشريًا، إلى 10^{-33} سنتيمتر. في جميع المقاييس «الكبيرة» المبكرة، كان الفضاء/المكان يبدو سلسًا تمامًا، مع قدر محدود جدًا (لكن صغير) من الانحناء. مع اقتراب التكبير المجهرى، ثم بالوصول إلى 10^{-32} سنتيمتر، يمكن للمرء أن يرى المكان يبدأ في الالتواء، بشكل طفيف جدًا في البداية، ثم بقوة أكبر، ثم عندما نصل إلى حجم 10^{-33} سنتيمتر، وكأنها مساحة تملأ عدسة مجهر فائق بأكملها، يصبح الفضاء/المكان عبارة عن زبد من الرغوة الكمومية الاحتمالية.



(a)



(b)



(c)

14.3 (مثل الشكل 13.7). مخطط التضمين الذي يوضح الرغوة الكمومية. هندسة وطوبولوجيا الفضاء ليستا محددين؛ بدلاً من ذلك، فهما احتمالان، على سبيل المثال، احتمال بنسبة 0.1 بالمائة للصيغة الموضحة في (a)، واحتمال بنسبة 0.4 بالمائة للشكل (b)، واحتمال بنسبة 0.02 بالمائة للشكل (c)، وهلم جرا.

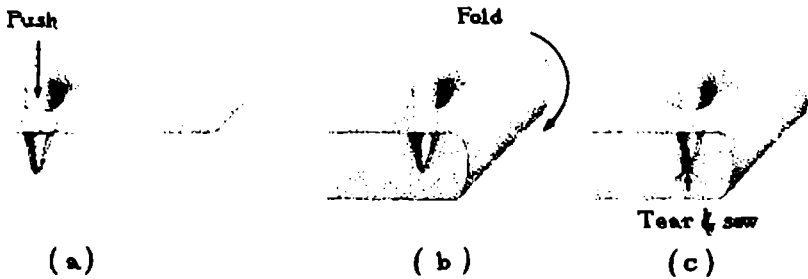
وبما أن الرغوة الكمومية موجودة في كل مكان، فمن المفري أن نتخيل حضارة لا حدود لتقدمها تصل إلى الرغوة الكمومية، وتجد فيها ثقباً دودياً (على سبيل المثال، الثقب «الكبير» في الشكل 14.3 b مع احتمال 0.4 بالمائة)، وتحاول الاستيلاء على هذا الثقب الدودي وتكبره إلى الحجم الكلاسيكي. وفي 0.4٪ من هذه المحاولات، إذا كانت الحضارة لا حدود لتقدمها حقاً، فقد تنجح. أم لا؟

نحن لا نفهم حتى الآن قوانين الجاذبية الكمومية جيداً بما يكفي من المعرفة. أحد أسباب جهلنا هو أننا لا نفهم الرغوة الكمومية نفسها جيداً. نحن لسنا متأكدين بنسبة 100٪ من وجودها. ومع ذلك، فإن التحدي المتمثل في تجربة ساجان الفكرية هذه

-وهي حضارة متقدمة تسحب ثقوبًا دودية من الرغوة الكمومية- قد يكون له بعض المساعدة في صياغة المفهوم في السنوات القادمة، وفي الجهود المبذولة لترسيخ فهمنا للرغوة الكمومية والجاذبية الكمومية.

هناك الكثير بالنسبة إلى الاستراتيجية الكمومية لإنشاء الثقب الدودي. فما الاستراتيجية الكلاسيكية إذن؟

في الاستراتيجية الكلاسيكية، ستحاول حضارتنا التي لا حدود لتقدمها تشويه الفضاء على المقاييس العيانية (المقاييس البشرية العادية)، وذلك لإنشاء ثقب دودي لم يكن موجودًا من قبل. ويبدو من الواضح إلى حد ما أنه لكي تنجح مثل هذه الاستراتيجية، لا بد من إحداث ثقبين في الفضاء وخياطتهما معًا. ويبين الشكل 14.4 مثالاً.



14.4 استراتيجية واحدة لصنع ثقب دودي. (a) إنشاء «الجورب» في انحناء الفضاء. (b) طي المساحة الموجودة خارج الجورب بلطف في المساحة الزائدة. (c) صنع ثقب صغير في إصبع الجورب، وإيجاد ثقب في الفضاء الموجود أسفل الثقب مباشرة، ثم «خياطة» حواف الثقبين معًا. تبدو هذه الاستراتيجية كلاسيكية (مجهولة) للوهلة الأولى. ومع ذلك، فإن التمزق يُنتج، على الأقل للحظات، مفردة زمنية تحكمها قوانين الجاذبية الكمومية، لذا فإن هذه الاستراتيجية هي في الواقع استراتيجية كمومية.

الآن، أي تمزيق للمكان يُنتج، للحظات، عند نقطة التمزق، مفردة للزمكان؛ أي حدًا حادًا ينتهي عنده الزمكان؛ وبما أن المفردة تخضع لقوانين الجاذبية الكمومية، فإن مثل هذه الاستراتيجية لصنع الثقوب الدودية هي في الواقع تابعة للميكانيكا الكمومية، وليست كلاسيكية. لن نعرف ما إذا كان مسموحًا بها حتى نفهم قوانين الجاذبية الكمومية.

أليس هناك مخرج؟ ألا توجد طريقة لصنع ثقب دودي من دون التشابك مع قوانين الجاذبية الكمومية غير المفهومة، ألا توجد طريقة كلاسيكية تمامًا؟

ومن المثير للدهشة إلى حد ما أن هذا الأمر موجود، ولكن فقط إذا دفع المرء ثمنًا باهظًا. في عام 1966، استخدم روبرت جيروش (أحد طلاب ويلر في جامعة برينستون) طرقًا عالمية لإظهار أنه يمكن للمرء بناء ثقب دودي عن طريق التواء ولف الزمكان بسلسلة وبطريقة خالية من المفردة، لكن لا يمكن للمرء القيام بذلك إلا إذا كان الزمن قد تغير في أثناء البناء. ويصبح أيضًا ملتويًا كما هو موضح في جميع الأطر المرجعية⁷. وبشكل أكثر تحديدًا، في أثناء استمرار البناء، يجب أن يكون من الممكن السفر إلى الماضي في الزمن المناسب، وكذلك إلى الأمام؛ «الآلة» التي تبني، أيًا كان نوعها، يجب أن تعمل لفترة وجيزة كآلة زمنية تحمل الأشياء من اللحظات المتأخرة من البناء إلى اللحظات الأولى (ولكن ليس إلى اللحظات التي سبقت بدء البناء).

كان رد الفعل العالمي على نظرية جيروش في عام 1967 هو «من المؤكد أن قوانين الفيزياء تحظر آلات الزمن، وبالتالي فإنها ستمنع بناء الثقب الدودي بشكل كلاسيكي؛ أي من دون إحداث ثقب في الفضاء».

في العقود التي تلت عام 1967، ثبت خطأ بعض الأشياء التي اعتقدنا أنها مؤكدة. (على سبيل المثال، لم نكن لنصدق قط في عام 1967 أن الثقب الأسود من الممكن أن يتبخّر). وقد علمنا هذا الحذر. وكجزء من حذرنا، والذي أثارته أسئلة من نوع أسئلة ساجان، بدأنا نطرح في أواخر الثمانينيات: «هل قوانين الفيزياء تحظر حقًا آلات الزمن، وإذا كان الأمر كذلك، فكيف؟». كيف يمكن للقوانين أن تفرض مثل هذا الحظر؟ سأعود إلى هذا السؤال لاحقًا.

دعونا الآن نتوقف ونعيد التقييم. في عام 1993، أفضل فهم لدينا للثقوب الدودية هو: إذا لم تنشأ الثقوب الدودية في الانفجار الأعظم، فإن الحضارة المتقدمة للغاية قد تحاول بناء واحد من خلال طريقتين، الكمومية (سحبه من الرغوة الكمومية) أو الكلاسيكية (لف الزمكان من دون تمزيقه). نحن لا نفهم قوانين الجاذبية الكمومية جيدًا بما يكفي لنستنتج - في عام 1993 - ما إذا كان البناء الكمومي للثقوب الدودية ممكنًا. نحن نفهم قوانين الجاذبية الكلاسيكية (النسبية العامة) جيدًا بما يكفي لنعرف أن البناء الكلاسيكي للثقوب الدودية مسموح به فقط إذا كانت آلة البناء - مهما كانت - تعصر الزمن بقوة، كما رأينا في جميع الأطر المرجعية، لدرجة أنها تنتج، على الأقل لفترة وجيزة، آلة الزمن.

نحن نعلم أيضًا أنه إذا حصلت حضارة لا حدود لتقدمها على ثقب دودي بطريقة أو بأخرى، فإن الطريقة الوحيدة لإبقاء الثقب مفتوحًا (حتى يمكن استخدامه للسفر بين النجوم) هي عن طريق ربطه بمواد غريبة. نحن نعلم أن التقلبات الفراغية للمجال الكهرومغناطيسي هي شكل واعد من المواد الغريبة: يمكن أن تكون غريبة (لديها متوسط كثافة طاقة سالب إذا قاسه شعاع ضوئي) في الزمكان المنحني في ظل مجموعة واسعة من الظروف. ومع ذلك، فإننا لا نعرف حتى الآن ما إذا أمكن أن تكون غريبة داخل الثقب الدودي، وبالتالي تجعل الثقب الدودي مفتوحًا.

في الصفحات القادمة، سأفترض أن حضارة لا حدود لتقدمها قد اكتسبت بطريقة ما ثقبًا دوديًا وأبقته مفتوحًا عن طريق نوع ما من المواد الغريبة؛ وسأسأل ما الاستخدامات الأخرى، إلى جانب السفر بين-النجوم، التي قد تجدها الحضارة لثقبها الدودي.

آلات الزمن

في ديسمبر 1986، عُقدت ندوة تكساس نصف السنوية الرابعة عشرة حول الفيزياء الفلكية النسبية في شيكاغو، إلينوي. أصبحت ندوات «تكساس» هذه، التي صُممت على غرار ندوة عام 1963 في دالاس، تكساس، حيث نوقش لغز النجوم الزائفة لأول مرة (الفصلان السابع والتاسع)، كنيسة راسخة. ذهبت إلى الندوة وألقيت محاضرة عن الأحلام والخطط الخاصة بمرصد LIGO (الفصل العاشر). كما ذهب مايك موريس (طالبي في «الثقب الدودي») ليحصل على أول لقاء كامل مع المجتمع الدولي لعلماء الفيزياء النسبية والفيزياء الفلكية.

وفي الممرات بين المحاضرات، تعرف موريس على توم رومان، وهو أستاذ مساعد شاب من جامعة ولاية كونيتيكت المركزية، والذي كان قد أنتج قبل عدة سنوات رؤية عميقة حول المادة الغريبة. تحولت محادثتهما بسرعة إلى الثقوب الدودية. وأشار رومان: «إذا كان من الممكن حقًا إبقاء الثقب الدودي مفتوحًا، فإنه سيسمح للمرء بالسفر عبر مسافات بين-النجوم بشكل أسرع بكثير من الضوء».

«ألا يعني هذا أنه يمكن للمرء أيضًا استخدام الثقب الدودي للسفر إلى الماضي عبر الزمن؟».

كم كان شعورنا أنا ومايك بالغباء! بالطبع؛ كان رومان على حق. لقد تعلمنا في الواقع عن هذا النوع من السفر عبر الزمن في طفولتنا من قصيدة شهيرة:

كان يا ما كان سيدة اسمها برايت
سافرت أسرع من الضوء بكثير.

ماتت ذات يوم بطريقة نسبية
وعادت إلى المنزل في الليلة السابقة.

بفضل تعليق رومان والقصائد الفكاهية الشهيرة التي تحفزنا، توصلنا بسهولة إلى كيفية بناء آلة الزمن باستخدام ثقبين دوديين يتحرك أحدهما بسرعات عالية بالنسبة إلى الآخر 8. (لن أصف آلة الزمن هذه هنا، لأنها معقدة بعض الشيء، لكن هناك آلة زمن أبسط وأسهل في وصفها وسأتحدث عنها قريباً).

أنا وحيد. أحب أن أعزل نفسي في الجبال أو ساحل البحر المنعزل، أو حتى في السندرة، وأفكر. تأتي الأفكار الجديدة ببطء وتتطلب قدرًا كبيرًا من الوقت الهادئ وغير المضطرب لتنشأ؛ وتتطلب الحسابات المهمة أيامًا أو أسابيع من التركيز المكثف والثابت. مكالمات هاتفية في اللحظة الخاطئة يمكن أن تعطل تركيزي، وتعيدني ساعات إلى الوراء. لذلك أختبئ من العالم.

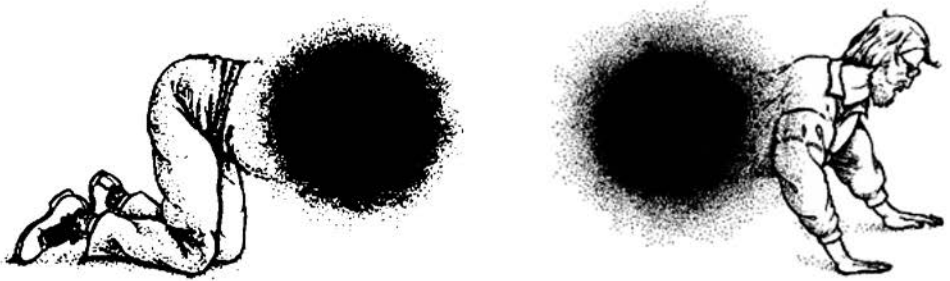
لكن الاختباء لفترة طويلة أمر خطير. أحتاج، من وقت لآخر، إلى التحفيز المثير للمحادثات مع الأشخاص الذين تختلف وجهات نظرهم وخبراتهم عن وجهات نظرنا وخبراتنا.

وقد وصفت في هذا الفصل حتى الآن ثلاثة أمثلة. لولا مكالمات كارل ساجان الهاتفية والتحدي المتمثل في جعل روايته صحيحة علميًا، لم أكن لأغامر قط بالبحث في الثقوب الدودية وآلات الزمن. لولا خطاب دون بايج، لم نكن أنا ومايك موريس نعرف أن جميع الثقوب الدودية - بصرف النظر عن شكلها - تتطلب مواد غريبة لإبقائها مفتوحة. ومن دون ملاحظة توم رومان، ربما كنا أنا وموريس قد واصلنا العمل بكل سرور غير مدركين أنه يمكن لحضارة متقدمة أن تصنع آلة الزمن بسهولة من الثقوب الدودية.

وفي الصفحات القادمة، سأصف أمثلة أخرى على الدور الحاسم الذي تلعبه تفاعلات وخز الإبرة. ومع ذلك، ليست كل الأفكار تنشأ بهذه الطريقة. بعضها ينشأ من الاستبطان. وكان يونيو 1987 مثالاً على ذلك.

في أوائل يونيو 1987، بعد خروجي بعدة أشهر من التدريس المحموم في حجرة الدراسة والتفاعلات مع مجموعتي البحثية وفريق مرصد LIGO، انسحبت، منهكًا، إلى العزلة. طوال فصل الربيع، كان ثمة شيء ما يضايقني، وأحاول تجاهله، في انتظار بضعة أيام من الهدوء، للتفكير. لقد جاءت تلك الأيام أخيرًا. في عزلتي، سمحت لما يضايقني بالتعبير عن نفسه، بالخروج من عقلي الباطن وبدأت في فحصه: «كيف يقرر الزمن الطريقة التي يربط بها ذاته عبر ثقب دودي؟» وكان هذا سبب الضيق.

لجعل هذا السؤال أكثر واقعية، فكرت في مثال: لنفترض أن لديَّ ثقبًا دوديًا قصيرًا جدًا، يبلغ طول نفقه عبر المكان الفائق 30 سنتيمترًا فقط، ولنفترض أن فتحتي الثقب الدودي كلتيهما -كرتان، قطر كل منهما متران- موجودتان في غرفة المعيشة في باسادينا. ولنفترض أنني تسلفت عبر الثقب الدودي، برأسي أولاً. ومن وجهة نظري يجب أن أخرج من الفم الثاني مباشرة بعد دخولي من الفم الأول، من دون أي تأخير على الإطلاق؛ في الحقيقة بينما يخرج رأسي من الفم الثاني، قدمي لا تزال تدخل في الفم الأول. هل هذا يعني أن زوجتي كارولي التي تجلس هناك على أريكة غرفة المعيشة، سوف ترى أيضًا رأسي يخرج من الفم الثاني في حين لا تزال قدمي تصعدان إلى الفم الأول، كما في الشكل 14.5؟ إذا كان الأمر كذلك، فإن الزمن «يرتبط عبر الثقب الدودي» بنفس الطريقة التي يرتبط بها خارج الثقب الدودي.



14.5 صورة لي وأنا أزحف عبر ثقب دودي افتراضي قصير جدًا.

ومن ناحية أخرى، سألت نفسي، أليس من الممكن على الرغم من أن الرحلة عبر الثقب الدودي لا تستغرق وقتًا تقريبيًا كما أراها، فإن على كارولي أن تنتظر ساعة قبل أن تراني أخرج من الفم الثاني؛ أليس من الممكن أيضًا أن تراني أخرج قبل ساعة من دخولي؟ إذا كان الأمر كذلك، فسيرتبط الزمن عبر الثقب الدودي بطريقة مختلفة عن ربطه خارج الثقب الدودي.

ما الذي يمكن أن يجعل الزمن يتصرف بهذه الغرابة؟ سألت نفسي. ومن ناحية أخرى، لماذا لا يتصرف بهذه الطريقة؟ فكرت أن قوانين الفيزياء وحدها هي التي تعرف الإجابة. بطريقة ما، يجب أن أكون قادرًا على الاستنتاج من قوانين الفيزياء كيف سيتصرف الزمن. وللمساعدة في فهم كيفية تحكم قوانين الفيزياء في ارتباط الزمن، فكرت في موقف أكثر تعقيدًا. لنفترض أن إحدى فتحتي الثقب الدودي ساكنة في غرفة معيشتي والأخرى في الفضاء بين النجوم، تبعد عن الأرض بسرعة الضوء تقريبًا. ولنفترض أنه على الرغم من هذه الحركة النسبية لفتحي، فإن طول الثقب الدودي (طول نفقه عبر المكان الفائق) يظل ثابتًا دائمًا عند 30 سنتيمترًا. (يشرح الشكل 14.6 كيف من الممكن أن يظل طول الثقب الدودي ثابتًا بينما يتحرك فمها، كما نرى في الكون الخارجي، أحدهما بالنسبة إلى الآخر). ثم، كما نرى في الكون الخارجي، يكون الفمَّان مختلفين في الإطارات المرجعية، الإطارات التي تتحرك بسرعة عالية بعضها بالنسبة إلى بعض؛ ولذلك يجب على الفمَّين أن يشهدا تدفقات زمنية مختلفة. من ناحية أخرى، كما يُرى من داخل الثقب الدودي، فإن الفمَّين يكون أحدهما في حالة راحة بالنسبة إلى الآخر، لذا فهما يشتركان في إطار مرجعي مشترك، مما يعني أن الفمَّين يجب أن يشهدا نفس تدفق الزمن. من وجهة النظر الخارجية، فإنهما يواجهان تدفقات زمنية مختلفة، ومن وجهة نظر داخلية، فإنهما يواجهان نفس التدفق الزمني؛ كم هذا مريب!



14.6 شرح لكيفية تحرك أحد فمّي الثقب الدودي بالنسبة إلى الآخر كما يظهر في الكون الخارجي، بينما يظل طول الثقب الدودي ثابتًا. كل من المخططات عبارة عن مخطط تضمين مثل الموجود في الشكل 14.1. الأشكال التوضيحية عبارة عن سلسلة من اللقطات التي تصور حركة الكون والثقب الدودي بالنسبة إلى المكان الفائق. (ومع ذلك، تذكر أن المكان الفائق هو مجرد نسج مفيد من خيالنا؛ ولا توجد طريقة تمكننا كبشر من رؤيته أو تجربته في الواقع؛ انظر الشكلين 3.2 و 3.3). بالنسبة إلى المكان الفائق، الجزء السفلي من كوننا ينزلق إلى اليمين في المخططات، في حين يظل الثقب الدودي والجزء العلوي من كوننا في حالة سكون. في المقابل، كما نرى في كوننا، يتحرك أحد فمّي الثقب الدودي بالنسبة إلى الآخر (يبتعد أحدهما عن الآخر)، ولكن كما نرى من خلال الثقب الدودي، أحدهما في حالة سكون بالنسبة إلى الآخر؛ طول الثقب الدودي لا يتغير.

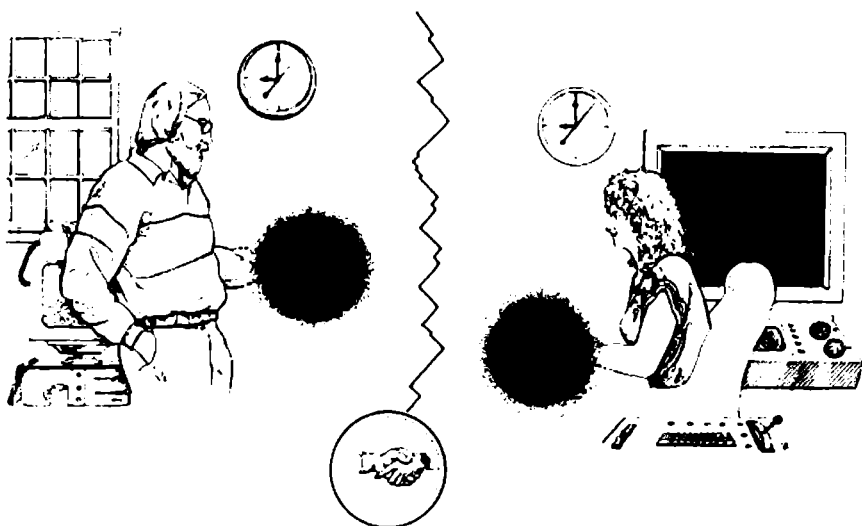
وتدرجياً، في عزلتي الهادئة، هداً الارتباك واتضح كل شيء. تتنبأ قوانين النسبية العامة، بشكل بَيِّن، بتدفق الزمن عند الفَمِّين، كما تتنبأ، بشكل بَيِّن، بأن التدفقين الزمنيين سيكونان متماثلين عند مقارنتهما عبر الثقب الدودي، لكنهما سيكونان مختلفين عند مقارنتهما خارج الثقب الدودي. الزمن، بهذا المعنى، يرتبط بذاته من خلال الثقب الدودي بشكل مختلف عنه من خلال الكون الخارجي، عندما يتحرك أحد الفَمِّين بالنسبة إلى الآخر.

وأدركت بعد ذلك أن هذا الاختلاف في الارتباط يعني أنه من خلال ثقب دودي واحد، يمكن لحضارة لا حدود لتقدمها أن تصنع آلة زمنية. ليست هناك حاجة إلى اثنين من الثقوب الدودية. كيف؟ هذا أمر سهل، إذا كان لا حدود لتقدمك.

لشرح كيفية ذلك، سأصف تجربة فكرية نكون فيها نحن البشر كائنات متقدمة بلا حدود. وجدت أنا وكارولي ثقباً دودياً قصيراً جداً، ووضعنا إحدى فتحته في غرفة المعيشة بمنزلنا والأخرى في السفينة الفضائية العائلية، بالخارج في الحديقة الأمامية.

الآن، كما ستُظهر هذه التجربة الفكرية، فإن الطريقة التي يرتبط الزمن بها عبر أي ثقب دودي تعتمد في الواقع على التاريخ الماضي للثقب الدودي. من أجل التبسيط، سأفترض أنه عندما حصلنا أنا وكارولي على الثقب الدودي لأول مرة، كان لديه أبسط رابط زمني ممكن: نفس الارتباط داخل الثقب الدودي هو نفسه في الكون الخارجي. بمعنى آخر، إذا تسقلت عبر الثقب الدودي، فسوف نتفق أنا وكارولي وكل من على الأرض على أن أخرج من الفم في السفينة الفضائية في نفس اللحظة التي دخلت فيها الفم في غرفة المعيشة.

بعد التحقق من أن الوقت مرتبط بالفعل عبر الثقب الدودي بهذه الطريقة، وضعت أنا وكارولي خطة: بينما سأبقى في المنزل في غرفة المعيشة بفم واحد، تأخذ كارولي في مركبتنا الفضائية من الفم الآخر رحلة عالية السرعة إلى الكون ثم العودة. طوال الرحلة، سيمسك أحدهنا بيد الآخر عبر الثقب الدودي؛ انظر الشكل 14.7.



14.7 أُنبي أنا وكارولي آلة زمنية من ثقب دودي. على اليسار: أبقى في المنزل في باسادينا بضم واحد من الثقب الدودي وأمسك بيد كارولي من خلال الثقب الدودي. على اليمين: تحمل كارولي الفم الآخر في رحلة عالية السرعة عبر الكون. أفتح يدنا داخل الثقب الدودي.

تغادر كارولي في الساعة 9:00 صباحًا. في الأول من (يناير) 2000، كما قاستها بنفسها، وبواسطتي، وبواسطة أي شخص آخر على وجه الأرض. تبتعد كارولي عن الأرض بسرعة تقارب سرعة الضوء لمدة 6 ساعات مقيسة بتوقيتها الخاص؛ ثم تعكس مسارها وتعود إلى الورا، لتصل إلى الحديقة الأمامية بعد 12 ساعة من مغادرتها وفقًا لزمناها. لقد أمسكت بيدها وشاهدتها من خلال الثقب الدودي طوال الرحلة، لذلك من الواضح أنني أوافق، في حين أنظر عبر الثقب الدودي، أنها عادت بعد 12 ساعة فقط، الساعة 9:00 مساءً. في الأول من (يناير) 2000. عندما نظرت من خلال الثقب الدودي في الساعة 9:00 مساءً، لم أرَ كارولي فقط، لكنني أستطيع أيضًا أن أرى خلفها حديقة الأمامية ومنزلنا.

ثم، في الساعة 9:01 مساءً، استدرت ونظرت من النافذة، وهناك رأيت حديقة أمامية فارغة. سفينة الفضاء ليست هناك. كارولي وفم الثقب الدودي الآخر ليسا هناك. وبدلاً من ذلك، إذا كان لديّ تلسكوب جيد بما فيه الكفاية موجه من النافذة، فسوف أرى سفينة كارولي الفضائية تطير بعيداً عن الأرض في رحلتها الخارجية، وهي رحلة ستستغرق 10

سنوات إذا قسناها على الأرض ونظرنا عبر الكون الخارجي. [هذه هي «مفارقة التوأمين» التقليدية؛ «التوأم» عالي السرعة الذي يخرج ويعود (كارولي) يقيس فاصلاً زمنياً قدره 12 ساعة فقط، في حين أن «التوأم» الذي يبقى على الأرض (أنا) يجب أن أنتظر 10 سنوات حتى تكتمل الرحلة].

ثم أمارس روتين حياتي اليومي. يوماً بعد يوم، شهراً بعد شهر، وعاماً بعد عام، وأصل حياتي، منتظراً حتى تعود كارولي أخيراً - في الأول من يناير - 2010 من رحلتها وتهبط في الحديقة الأمامية. أخرج لمقابلتها، وكما هو متوقع، وجدت أنها تبلغ من العمر 12 ساعة فقط، وليس 10 سنوات. إنها تجلس هناك في سفينة الفضاء، ويدها مغروسة في قم الثقب الدودي، وتمسك بيد شخص ما. أقف خلفها، أنظر إلى قمها، وأرى أن الشخص الذي تمسك بيده هو أنا، أصغر منها بعشر سنوات، الجالس في غرفة معيشتنا في الأول من يناير 2000. لقد أصبح الثقب الدودي آلة زمن. إذا تسقلت الآن في 1 يناير 2010 إلى قم الثقب الدودي في سفينة الفضاء، فسوف أخرج من خلال الفم الآخر في غرفة معيشتنا في 1 يناير 2000، وهناك سألتقي بنفسني الأصغر سناً. وبالمثل، إذا تسلق شخصي الأصغر سناً إلى الفم في غرفة المعيشة في 1 يناير 2000، فسوف أخرج من الفم في سفينة الفضاء في 1 يناير 2010. والسفر عبر الثقب الدودي في اتجاه واحد يعيدني 10 سنوات إلى الوراء؛ السفر في الاتجاه الآخر يأخذني 10 سنوات إلى الأمام.

ومع ذلك، لا أستطيع أنا ولا أي شخص آخر استخدام الثقب الدودي للسفر عبر الزمن إلى ما بعد الساعة 9:00 مساءً، في الأول من يناير 2000. من المستحيل السفر إلى وقت أبكر من الوقت الذي أصبح فيه الثقب الدودي آلة زمن لأول مرة.

قوانين النسبية العامة لا جدال فيها. إذا كان من الممكن إبقاء الثقوب الدودية مفتوحة بواسطة مواد غريبة، فهذه هي توقعات النسبية العامة.

في صيف عام 1987، بعد شهر أو نحو ذلك من وصولي إلى هذه التوقعات، اتصل ريتشارد بريس هاتفياً بكارولي. قلق ريتشارد عليّ - وهو صديق مقرب لي والرجل الذي أظهر قبل ستة عشر عاماً أن الثقب الأسود يشع كل «شعره» (الفصل السابع). لقد سمع أنني أعمل على نظرية آلات الزمن، وكان يخشى أن أكون قد أصبت بالجنون أو بالشيخوخة أو... حاولت كارولي طمأنته.

لقد صدمتني مكالمة ريتشارد قليلاً. ليس لأنه شكك في سلامتي العقلية؛ لقد كان لديّ القليل من الشكوك بالفعل. ومع ذلك، إذا كان حتى أصدقائي المقربون يشعرون بالقلق، (على الأقل كحماية لمايك موريس وطلابي الآخرين، إن لم يكن لنفسني) يجب أن أكون حذرًا بشأن كيفية تقديم بحثنا إلى مجتمع الفيزيائيين وإلى المجتمع الشعبي.

خلال شتاء 1987-1988، وكجزء من حذري، قررت التحرك ببطء لنشر أي شيء يتعلق بآلات الزمن. بالتعاون مع اثنين من الطلاب، مايك موريس وأولفي يورتسيفير، ركزت على محاولة فهم كل ما أستطيع فهمه عن الثقوب الدودية والزمن. فقط بعد أن أصبحت كل القضايا واضحة تمامًا، رغبت في النشر.

لقد عملنا أنا وموريس ويورتسيفير معًا عن طريق الحاسوب والهاتف، حيث كنت مختبئًا في عزلة. حصلت كارولي على موعد لدراسة ما بعد الدكتوراه لمدة عامين في ماديسون، فايسكونسن، وكنت أنا «ربة المنزل» خلال الأشهر السبعة الأولى (من يناير إلى يوليو من عام 1988). لقد أعددت جهاز الحاسوب الخاص بي وطاولات العمل في سندرة المنزل الذي استأجرناه في ماديسون؛ وكنت أقضي معظم ساعات يقظتي هناك في السندرة، أفكر وأحسب وأكتب - إلى حد كبير في مشاريع أخرى، وجزئيًا في الثقوب الدودية والزمن.

من أجل التحفيز واختبار أفكارتي ضد «خصوم» ماهرين، كنت أقود سيارتي كل بضعة أسابيع إلى ميلووكي للتحدث مع مجموعة رائعة من الباحثين في النسبية بقيادة جون فريدمان وليونارد باركر، وأحيانًا كنت أقود سيارتي إلى شيكاغو للتحدث مع مجموعة رائعة أخرى بقيادة سابرامانين تشاندرا سكار وروبرت جيروش وروبرت والد.

في زيارة قمت بها إلى شيكاغو في شهر مارس، شعرت بالصدمة. لقد قدمت ندوة أصف فيها كل ما فهمته عن الثقوب الدودية وآلات الزمن؛ وبعد الندوة، سألني جيروش ووالد (في الواقع): «ألن يدمر الثقب الدودي تلقائيًا كلما حاولت حضارة متقدمة تحويله إلى آلة زمنية؟».

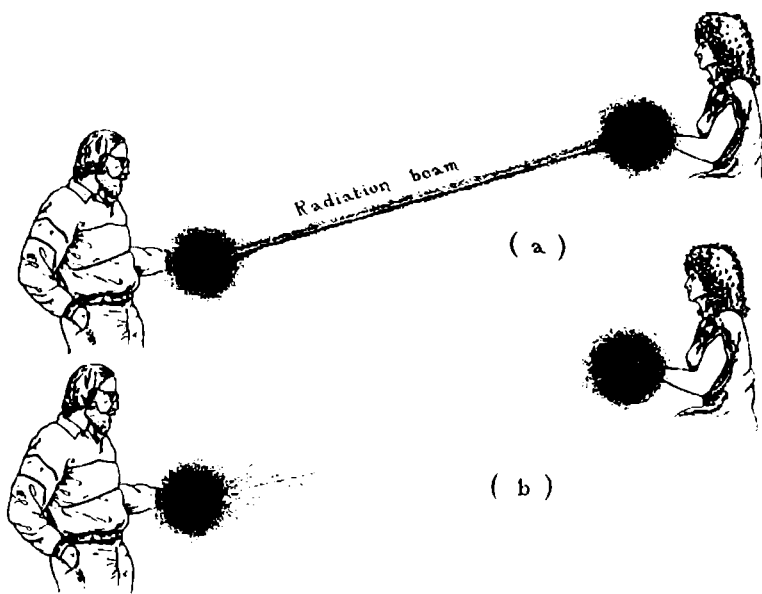
لماذا؟ كيف؟

أردت أن أعرف.

لقد أوضح لي. ترجمتُ إلى لغة قصتي أنا وكارولي، وكان تفسيرهما هو التالي: تخيل أن كارولي تعود إلى الأرض بفم ثقب دودي في مركبتها الفضائية وأنا جالس في المنزل على الأرض مع الفم الآخر. بعد وقت قصير من استدارتها والبدء في العودة إلى

المنزل، أصبح فجأة من الممكن للإشعاع (الموجات الكهرومغناطيسية) استخدام الثقب الدودي للسفر عبر الزمن: أي جزء عشوائي من الإشعاع يترك منزلنا في باسادينا فينتقل بسرعة الضوء باتجاه مركبتها الفضائية يمكن أن يصل إلى مركبتها الفضائية بعد مرور 5 سنوات (كما نقيسها بالزمن الأرضي)، يدخل إلى فم الثقب الدودي هناك، فيسافر عبر الزمن بمقدار 5 سنوات (كما تظهر على الأرض)، ويخرج من الفم على الأرض في نفس اللحظة التي تبدأ فيها بالضبط رحلتها. يتراكم الإشعاع فوق نفسه السابقة، ليس فقط في المكان ولكن في الزمكان، مما يضاعف قوته. بالإضافة إلى ذلك، خلال الرحلة، تعزز كل كمية من الإشعاع «كل فوتون» داخل الطاقة بسبب الحركة النسبية لفمّي الثقب الدودي (تعزيز أو تكبير «إزاحة دوبلر»).

بعد الرحلة التالية للإشعاع إلى السفينة الفضائية ثم عودته عبر الثقب الدودي، يعود مرة أخرى في نفس الوقت الذي غادر فيه ويتراكم مرة أخرى على نفسه، مرة أخرى بطاقة معززة بدوبلر. ويحدث هذا مرارًا وتكرارًا، مما يجعل حزم الإشعاع قوية بلا حدود (الشكل 14.8 a).



14.8 (a) اقترح جيروش-والد حول كيفية تدمير الثقب الدودي عندما يحاول المرء تحويله إلى آلة زمنية. ينطلق شعاع مكثف من الإشعاع بين الفمين من خلال الثقب الدودي، ويتراكم ويعزز نفسه. يصبح الشعاع نشيطاً بلا حدود ويدمر الثقب الدودي. (b) ما يحدث بالفعل. يلغي الثقب الدودي تركيز الشعاع، مما يقلل من كمية التراكم. يبقى الشعاع ضعيفاً. لم يدمر الثقب الدودي.

بهذه الطريقة، بدءًا بكمية صغيرة اعتباطية من الإشعاع، تنشأ أشعة ذات طاقة لا نهائية، تتدفق عبر المكان بين فتحتي الثقب الدودي. عندما يمر الشعاع عبر الثقب الدودي، جادل جيروش ووالد، فإنه سينتج انحناءً لا نهائيًا للمكان وربما يدمر الثقب الدودي، وبالتالي يمنع الثقب الدودي من أن يصبح آلة زمن.

قادت سيارتي بعيدًا عن شيكاغو وعبر الطريق السريع 90 باتجاه ماديسون وأنا في حالة ذهول. كان ذهني مليئًا بالصور الهندسية لحزم الإشعاع التي تنطلق من إحدى فتحتي الثقب الدودي إلى الأخرى، في حين يتحرك أحد الفئمين تجاه الآخر. كنت أحاول أن أحسب، من الناحية التصويرية، ما سيحدث. كنت أحاول أن أفهم ما إذا كان جيروش ووالد على صواب أم على خطأ.

تدريجيًا، مع اقترابي من حدود ولاية فايسكونسن، أصبحت الصور في ذهني واضحة. لن يدمر الثقب الدودي. لقد تجاهل جيروش ووالد حقيقة حاسمة: في كل مرة تمر فيها حزمة من الإشعاع عبر الثقب الدودي، يلغي الثقب الدودي تركيزه بالطريقة الموضحة في المربع 14.1 العلوي. بعد إزالة التركيز البؤري، يخرج الشعاع من الفم على الأرض وينتشر على مساحة واسعة من الفضاء، بحيث لا يمكن التقاط سوى جزء صغير منه عن طريق الفم على السفينة الفضائية ونقله عبر الثقب الدودي إلى الأرض لـ«بتكسد» على نفسه (الشكل 14.8 b).

يمكنني أن أفعل هذا الجمع بصريًا في رأسي في أثناء القيادة. من خلال جمع كل الإشعاع الناتج عن جميع الرحلات عبر الثقب الدودي (كمية أصغر وأصغر بعد كل رحلة لإزالة التركيز البؤري)، حسبت أن الشعاع النهائي سيكون ضعيفًا؛ أضعف بكثير من أن يتمكن من تدمير الثقب الدودي.

وتبين أن حساباتي كانت صحيحة، ولكن، كما سأشرح لاحقًا، كان ينبغي عليّ أن أكون أكثر حذرًا. كان ينبغي لهذه اللمحة من فكرة تدمير الثقب الدودي أن تحذرنني من أن مخاطر غير متوقعة تنتظر أي صانع لآلات الزمن.

عندما يصل طلاب الدراسات العليا إلى السنة النهائية من أبحاثهم، غالبًا ما يمنحوني متعة كبيرة. إنهم ينتجون رؤى رئيسية بأنفسهم؛ يجادلونني وينتصرون؛ يعلمونني أشياء غير متوقعة. كانت هذه هي الحال مع مورييس ويورتسيفير حيث انتقلنا تدريجيًا نحو وضع

اللمسات النهائية على مخطوطتنا الخاصة بدورية مراجعة رسائل الفيزيائية. وكانت أجزاء كبيرة من التفاصيل التقنية والأفكار التقنية للمخطوطة من إنتاجهما.

ومع اقتراب عملنا من الاكتمال، تأرجحت بين القلق بشأن تشويه السمعة العلمية الناشئة لموريس ويورتسيفير من خلال وصفهما بـ «فيزيائي الخيال العلمي المجنونين»، والحماس للأشياء التي تعلمناها وبشأن إدراكنا أن الأسئلة من نوع أسئلة ساجان يمكن أن تكون قوية في أبحاث الفيزياء. في اللحظة الأخيرة، عندما انتهينا من الورقة، كتبت تحذيري (الذي يبدو أن موريس ويورتسيفير لا يشاركانني فيه)، واتفقت معهما على إعطاء بحثنا عنوان «الثقوب الدودية، وآلات الزمن، وحالة الطاقة الضعيفة» («حالة الطاقة الضعيفة» هي المصطلح العلمي المرتبط بـ «المادة الغريبة»).

وعلى الرغم من وجود «آلات الزمن» في العنوان، فقد قُبل بحثنا للنشر من دون أي شك. يبدو أن الحكمين المجهولين متعاطفان. تنفست الصعداء.

ومع اقتراب موعد النشر، أخذني الحذر من جديد؛ لقد طلبت من موظفي مكتب العلاقات العامة في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا تجنب، بل ومحاولة قمع أي وكل الدعاية حول أبحاث آلة الزمن الخاصة بنا. إن الضجة المثيرة في الصحافة قد تجعل بحثنا مجنوناً في نظر العديد من علماء الفيزياء، وأردت أن يدرس مجتمع الفيزياء بحثنا بجدية. وافق موظفو العلاقات العامة.

نُشرت ورقتنا، وكل شيء سار على ما يرام. وكما كنت أتمنى، فونها الصحافة، لكنها أثارت الاهتمام والجدل بين الفيزيائيين. وتدفقت الرسائل، وطرحت أسئلة وطعنت في ادعاءاتنا، لكننا قمنا بواجبنا. كانت لدينا إجابات. (كانوا مستعدين جيداً).

وكانت ردود أفعال أصدقائي مختلطة. استمر ريتشارد بريس في القلق. لقد قرر أنني لست مجنوناً أو خَرِفاً، لكنه كان يخشى أن أُلطخ سمعتي. وعلى النقيض من ذلك، كان صديقي الروسي إيجور نوفيكوف يشعر بسعادة غامرة. وفي اتصال هاتفي من سانتا كروز، كاليفورنيا، حيث كان يزورها، قال نوفيكوف: «أنا سعيد للغاية يا كيب! لقد كسرت الحاجز. إذا كان بإمكانك نشر بحث عن آلات الزمن، فأنا أستطيع ذلك أيضاً!»، وشرع في القيام بذلك على الفور.

مفارقة قتل الأم

من بين الخلافات التي أثارتها ورقتنا البحثية، كان أكثرها قوة هو ما أحب أن أسميه مفارقة قتل الأم¹⁰: إذا كانت لديّ آلة زمنية (قائمة على ثقب دودي أو غير ذلك)، يجب أن أكون قادرًا على استخدامها للعودة بالزمن إلى الوراء وأقتل أمي قبل أن تحمل بي، وبذلك أمنع نفسي من الولادة وأقتل أمي¹¹.

ومن الأمور المركزية في مفارقة قتل الأم مسألة الإرادة الحرة: هل لديّ، أم لا، كإنسان، القدرة على تحديد مصيري؟ هل يمكنني حقًا أن أقتل أمي، بعد الرجوع بالزمن إلى الماضي، أم (كما هي الحال في العديد من قصص الخيال العلمي) هل سيمنع يدي شيء ما حتمًا عندما أحاول طعنها في أثناء نومها؟

الآن، حتى في الكون بعيدًا عن آلات الزمن، فإن الإرادة الحرة أمر صعب التعامل معه للغاية بالنسبة إلى الفيزيائيين. نحن عادة نحاول تجنب ذلك. إنه يسبب خلطًا بين القضايا التي قد تكون واضحة. ومع آلات الزمن، يصبح الأمر أكثر خطورة. وبناءً على ذلك، قُبِلَ نشر بحثنا (ولكن بعد مناقشات طويلة مع زملائنا في ميلووكي)، قررت أنا وموريس ويورتسيفر تجنب مسألة الإرادة الحرة تمامًا. لقد أصررنا على عدم مناقشة البشر الذين يمرون عبر آلة الزمن القائمة على ثقب دودي تمامًا. وبدلًا من ذلك، تعاملنا فقط مع الأشياء البسيطة غير الحية التي تسافر عبر الزمن، مثل الموجات الكهرومغناطيسية.

قبل النشر، فكرنا كثيرًا في الموجات التي تنتقل عبر الزمن عبر الثقب الدودي؛ لقد بحثنا جاهدين عن مفارقات غير قابلة للحل في تطور الموجات. في نهاية المطاف (وبتحرير حاسم من جون فريدمان)، أقنعنا أنفسنا بأنه ربما لن تكون هناك مفارقات غير قابلة للحل، وقد توقعنا ذلك في ورقتنا البحثية¹². حتى إننا وسّعنا حدسنا لنشير إلى أنه لن تكون هناك أبدًا مفارقات غير قابلة للحل لأي جسم غير حي يمر عبر الثقب الدودي. كان هذا التخمين هو الذي أثار أكبر قدر من الجدل.

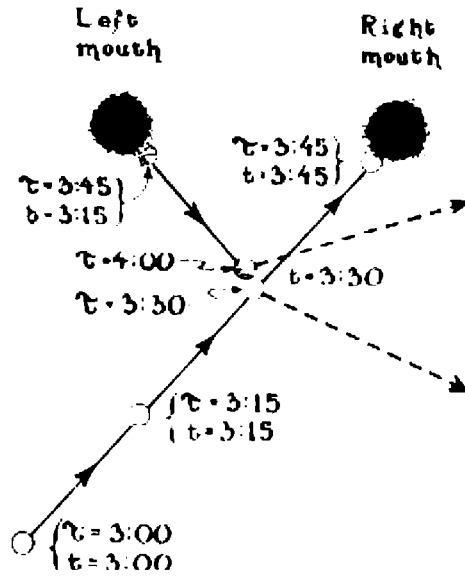
من بين الرسائل التي تلقيناها، كانت الرسالة الأكثر إثارة للاهتمام هي من جو بولشينسكي، أستاذ الفيزياء في جامعة تكساس في أوستن. كتب بولشينسكي: «عزيزي كيب... إذا فهمت بشكل صحيح، فأنت تفترض أنه في [آلة الزمن القائمة على الثقب

الدودي، لن تكون هناك مفارقات غير قابلة للحل]. يبدو لي أن... ليست هذه هي القضية». ثم طرح بعد ذلك نسخة أنيقة وبسيطة من مفارقة قتل الأم، وهي نسخة غير متشابكة مع الإرادة الحرة، ولذلك شعرنا بالكفاءة لتحليلها:

خذ ثقبًا دوديًا تحول إلى آلة زمنية، ثم ضع فمَّيه في حالة سكون بالقرب من بعضهما، في الفضاء بين الكواكب (الشكل 14.9). بعد ذلك، إذا أطلقت كرة بلياردو باتجاه الفم الأيمن من موقع أولي مناسب وبسرعة أولية مناسبة، فإن الكرة ستدخل الفم الأيمن، وتساfer إلى الماضي عبر الزمن المناسب، وتطير خارج الفم الأيسر قبل أن تدخل الفم الأيمن (كما سنرى أنا وأنت خارج الثقب الدودي)، وبعد ذلك سوف تضرب نفسها الأصغر سنًا، وبالتالي تمنع نفسها من دخول الفم الأيمن وتضرب نفسها.

هذا الوضع، مثل مفارقة قتل الأم، يستلزم العودة بالزمن إلى الوراء وتغيير التاريخ. في مفارقة قتل الأم، أعود بالزمن إلى الوراء، وبقتل أمي، أمنع نفسي من الولادة. في مفارقة بولشينسكي، تعود كرة البلياردو بالزمن إلى الوراء، ومن خلال ضرب نفسها، تمنع نفسها من العودة بالزمن إلى الوراء.

كلتا الحالتين غير منطقيتين. مثلما يجب أن تكون قوانين الفيزياء متسقة منطقيًا بعضها مع بعض، كذلك فإن تطور الكون، كما تحكمه قوانين الفيزياء، يجب أن يكون متسقًا تمامًا مع نفسه - أو على الأقل يجب أن يكون كذلك عندما يتصرف الكون بشكل كلاسيكي. (بعيدًا عن الميكانيكا الكمومية)؛ عالم الميكانيكا الكمومية أكثر دقة قليلًا. وبما أن كلينا أنا وكرة البلياردو كائنات كلاسيكيات للغاية (أي أننا لا نستطيع أن نُظهر سلوكًا يتوافق مع الميكانيكا الكمومية إلا عندما يُجري المرء قياسات دقيقة للغاية علينا؛ انظر الفصل العاشر)، فلا توجد طريقة يمكنني من خلالها أنا أو كرة البلياردو العودة إلى الوراء في الزمن المناسب وتغيير تاريخنا.



14.9 نسخة كرة البلياردو لبولشينسكي من مفارقة قتل الأم. الثقب الدودي قصير جداً وقد تحول إلى آلة زمنية، بحيث يخرج أي شيء يدخل الفم الأيمن، كما قيس من الخارج، قبل 30 دقيقة من دخوله. ويُشار إلى تدفق الزمن خارج الفم بالرمز t ، يُشار إلى تدفق الزمن الذي تمر به كرة البلياردو نفسها بالرمز τ . أطلقت كرة البلياردو عند الساعة $t = 3:00$ مساءً. من الموقع المشار إليه وبالسّعة المناسبة فقط للدخول إلى الفم الأيمن عند $t = 3:45$. تخرج الكرة من الفم الأيسر قبل 30 دقيقة، عند الساعة $t = 3:15$ ، ثم تضرب نفسها الأصغر سنّاً عند الساعة $t = 3:30$ مساءً، مما يؤدي إلى خروجها عن المسار بحيث لا تتمكن من دخول الفم الأيمن وتضرب نفسها.

إذن ماذا يحدث لكرة البلياردو؟ لمعرفة ذلك، ركزنا أنا وموريس ويورتسيفير اهتمامنا على الظروف الأولية للكرة؛ أي موقعها الأولي وسرعتها الاتجاهية. لقد سألنا أنفسنا: «بالنسبة إلى نفس الظروف الأولية التي أدت إلى مفارقة بولشينسكي، هل هناك أي مسار آخر لكرة البلياردو يمثل حلاً متسقاً ذاتياً منطقياً للقوانين الفيزيائية التي تحكم كرات البلياردو الكلاسيكية؟». وبعد الكثير من المناقشات، اتفقنا على أن الإجابة ربما كانت «نعم»، لكننا لم نكن متأكدين تماماً - ولم يكن هناك وقت لنكتشف ذلك. كان موريس ويورتسيفير قد أكمل درجة الدكتوراه وكانا يغادران معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا لتولي تعيينات ما بعد الدكتوراه في ميلووكي وتريست.

ولحسن الحظ، يجذب معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا الطلاب المتفوقين باستمرار. كان هناك لاعبان جديداً ينتظران في الأجنحة: فرناندو إيشيفيريا وجونار كلينكهامر. أخذ إيشيفيريا وكلينكهامر مفارقة بولشينسكي وتعامل معها: بعد بضعة أشهر من الصراع الرياضي المتقطع، أثبتا أن هناك بالفعل مساراً متسقاً تماماً لكرة البلياردو يبدأ ببيانات بولشينسكي الأولية ويلبي جميع قوانين الفيزياء التي تحكم كرات البلياردو الكلاسيكية. في الواقع، هناك مساران من هذا القبيل. وهما موضحان في الشكل 14.10. وسأصف كلا المسارين، كل على حدة، من وجهة نظر الكرة نفسها.

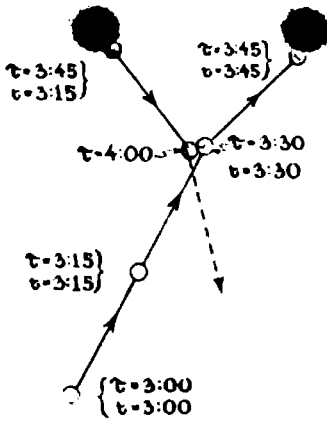
في المسار (a) (النصف الأيسر من الشكل 14.10)، تبدأ الكرة، الشابة والنظيفة والأصلية، في التحرك عند الوقت $t = 3:00$ مساءً، وتحرك على طول نفس المسار تماماً كما في مفارقة بولشينسكي (الشكل 14.9)، يأخذها الطريق نحو الفم الأيمن للثقب الدودي. بعد نصف ساعة، عند الساعة $t = 3:30$ ، تصطدم الكرة الصغيرة الأصلية على جانبها الخلفي الأيسر بكرة متشقة تبدو أكبر سنّاً (والتي سيتبين أنها نفسها الأكبر سنّاً). يكون الاصطدام لطيفاً بما يكفي لحرف الكرة الصغيرة عن مسارها الأصلي قليلاً فقط، ولكنه قوي بما يكفي لكسرها. تستمر الكرة الصغيرة، المتشقة الآن، للأمام على طول مسارها المتغير قليلاً وتدخل فم الثقب الدودي عند $t = 3:45$ ، وتسافر إلى الورا في الزمن بمقدار 30 دقيقة، وتخرج من الفم الآخر عند $t = 3:15$. نظرًا لأن مسارها قد تغير قليلاً بالمقارنة مع مسار بولشينسكي المتناقض (الشكل 14.9)، فإن الكرة، التي أصبحت الآن قديمة ومتشقة، تضرب نفسها الأصغر سنّاً بضربة خفيفة وخاطفة على الجانب الخلفي الأيسر عند الساعة $t = 3:30$ ، بدلاً من الضربة القوية شديدة الانحراف في الشكل 14.9. وبذلك يصبح التطور متسقاً ذاتياً تماماً.

المسار (b)، النصف الأيمن من الشكل 14.10، هو نفس المسار (a)، باستثناء أن هندسة الاصطدام مختلفة قليلاً، وبالتالي يختلف المسار بين الاصطدامين قليلاً. على وجه الخصوص، تخرج الكرة القديمة المتشقة من الفم الأيسر في مسار مختلف عما هو عليه في (a)، وهو مسار يأخذها في مقدمة الكرة الأصغر (بدلاً من خلفها)، ويتج عنها ضربة خاطفة على مقدمة الجانب الأيمن للكرة الأصغر (بدلاً من الجانب الخلفي الأيسر).

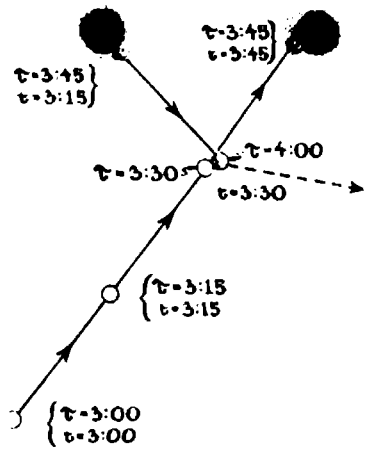
أظهر إيشيفيريا وكلينكهامر أن كلا المسارين (a) و (b) يستوفيان جميع القوانين الفيزيائية التي تحكم كرات البلياردو الكلاسيكية، لذا فإن كلا المسارين مرشحان

محتملان للظهور في الكون الحقيقي (إذا كان الكون الحقيقي يحتوي على آلات زمنية تعتمد على الثقوب الدودية).

وهذا هو المثير للقلق. مثل هذا الموقف لا يمكن أن يحدث أبدًا في الكون من دون آلات الزمن. من دون آلات الزمن، فإن كل مجموعة من الشروط الأولية لكرة البلياردو تؤدي إلى مسار واحد فقط يلبي جميع قوانين الفيزياء الكلاسيكية. هناك تنبؤ فريد لحركة الكرة. لقد دمرت آلة الزمن هذا. يوجد الآن تنبؤان متساويان في الجودة لحركة الكرة.



(a)



(b)

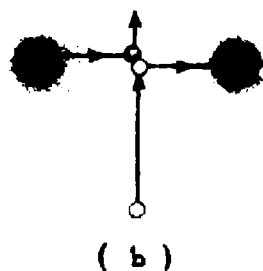
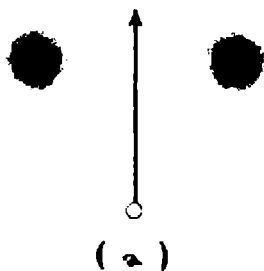
14.10 حل نسخة بولشينسكي لمفارقة قتل الأم (الشكل 14.9): كرة بلياردو، تبدأ في الساعة 3:00 مساءً. بنفس الظروف الأولية (نفس الموقع والسرعة) كما في مفارقة بولشينسكي، يمكن أن تتحرك على طول أي من المسارين الموضحين هنا. كلا المسارين متسق ذاتيًا تمامًا وبقي بقوانين الفيزياء الكلاسيكية في كل مكان على طول المسار.

في الواقع، الوضع أسوأ مما يبدو للوهلة الأولى: آلة الزمن تتيح عددًا لا حصر له من التنبؤات الجيدة المتساوية لحركة الكرة، وليس اثنين فقط. يُظهر المربع 14.2 مثالًا بسيطًا.

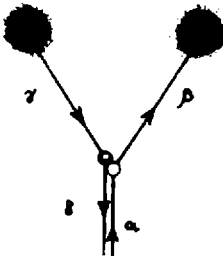
الإطار 14.2

أزمة كرة البلياردو: لا نهاية للمسارات

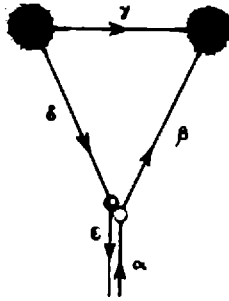
في أحد الأيام، بينما أنا جالس في مطار سان فرانسيسكو في انتظار الطائرة، خطر لي أنه إذا أطلقت كرة بلياردو بين فمَي آلة زمنية تعتمد على ثقب دودي، فهناك مساران يمكن أن تسافر فيهما. وفي واحد (a) تندفع بين الفمَّين سالمة. وأما الآخر (b) فإنها في أثناء مرورها بين الفمَّين، تُضرب وتضدم يمينًا، نحو الفم الأيمن؛ ثم تنزل إلى أسفل الثقب الدودي، وتخرج من الفم الأيسر قبل أن تنزل، وتضرب نفسها، وتطير بعيدًا.



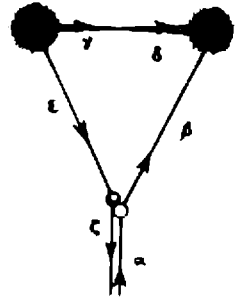
وبعد بضعة أشهر، اكتشف روبرت فوروارد [أحد رواد كواشف موجات الجاذبية بمقياس التداخل الليزري (الفصل العاشر) وأيضًا كاتب خيال علمي] مسارًا ثالثًا يرضي جميع قوانين الفيزياء، وهو المسار (c) أدناه: الاصطدام، بدلًا من أن يحدث بين الفمَّين، يحدث قبل أن تصل الكرة إلى محيط الفمَّين. أدركت بعد ذلك أن الاصطدام يمكن أن يحدث مبكرًا جدًا، كما في (d) و(e)، إذا تحركت الكرة عبر الثقب الدودي عدة مرات بين زيارتيها لحدث الاصطدام. على سبيل المثال، في (e)، تنتقل الكرة إلى أعلى المسار α ، وتعرض لضربة من نفسها الأكبر سنًا وتسقط على طول β في الفم الأيمن؛ ثم تنتقل عبر الثقب الدودي (وتعود بالزمن إلى الماضي)، وتخرج من الفم الأيسر عند γ ، والذي يأخذها عبر الثقب الدودي مرة أخرى (ولا يزال أبعد في الزمن)، وتخرج على طول δ ، والذي يأخذها عبر الثقب الدودي مرة أخرى (وحتى أبعد من ذلك في الزمن)، حيث تظهر على طول ϵ ، والذي يأخذها إلى حدث الاصطدام، والذي ينحرف منها إلى الأسفل ζ .



(c)



(d)



(e)

من الواضح أن هناك عددًا لا حصر له من المسارات (لكل منها عدد مختلف من طرق اجتياز الثقوب الدودية) التي تلبي جميعها قوانين الفيزياء الكلاسيكية (غير الكمومية)، وتبدأ جميعها بنفس الشروط الأولية المتطابقة (نفس تموضع كرة البلياردو الأولية ونفس ظروف السرعة الأولية). ويتساءل المرء ما إذا كانت الفيزياء أصبحت مجنونة، أو ما إذا كانت قوانين الفيزياء، بدلاً من ذلك، يمكن أن نخبرنا بطريقة أو بأخرى عن المسار الذي يجب أن تسلكه الكرة.

هل تجعل آلات الزمن الفيزياء مجنونة؟ هل تجعل من المستحيل التنبؤ بكيفية تطور الأشياء؟ إذا لم يكن الأمر كذلك، فكيف تختار قوانين الفيزياء المسار الذي ستتبعه كرة البلياردو من بين المجموعة اللانهائية المسموح بها؟

بحثاً عن إجابة، تحولت أنا وجونار كلينكهامر في عام 1989 من القوانين الكلاسيكية للفيزياء إلى القوانين الكمومية. لماذا القوانين الكمومية؟ لأنها الحاكم النهائي لعالمنا.

على سبيل المثال، قوانين الجاذبية الكمومية لها السيطرة المطلقة على الجاذبية وبنية المكان والزمن. إن قوانين النسبية العامة الكلاسيكية لأينشتاين للجاذبية هي مجرد تقديرات تقريبية لقوانين الجاذبية الكمومية - وهي تقديرات تقريبية بدقة ممتازة عندما يكون المرء بعيداً عن كل المفردات وينظر إلى الزمكان على مقاييس أكبر بكثير من 10-33 سنتيمتر، ولكنها تقديرات تقريبية مع ذلك (الفصل الثالث عشر).

وبالمثل، فإن القوانين الكلاسيكية لفيزياء كرة البلياردو، التي استخدمناها أنا وطلابي في دراسة مفارقة بولشينسكي، هي مجرد تقديرات تقريبية لقوانين الميكانيكا الكمومية.

نظرًا لأن القوانين الكلاسيكية تبدو وكأنها تنبأ بـ«الهراء» (عدد لا نهائي من مسارات كرات البلياردو المحتملة)، فقد لجأنا أنا وكليנקهامر إلى قوانين الميكانيكا الكمومية لفهم أعمق.

تختلف «قواعد اللعبة» كثيرًا في الفيزياء الكمومية عنها في الفيزياء الكلاسيكية. عندما يزود المرء القوانين الكلاسيكية بالشروط الأولية، فإنها تنبأ بما سيحدث بعد ذلك (على سبيل المثال، المسار الذي ستتبعه الكرة)؛ وإذا لم تكن هناك آلات زمنية، فإن تنبؤاتها ستكون فريدة من نوعها. وعلى النقيض من ذلك، تنبأ القوانين الكمومية فقط باحتمالات ما سيحدث، وليس باليقين (على سبيل المثال، احتمال انتقال الكرة عبر هذه المنطقة أو تلك أو منطقة أخرى من المكان).

في ضوء قواعد لعبة الميكانيكا الكمومية هذه، فإن الإجابة التي حصلنا عليها أنا وكليנקهامر من قوانين الميكانيكا الكمومية ليست مفاجئة. لقد تعلمنا أنه إذا بدأت الكرة تتحرك على طول المسار المتناقض لبولشينسكي (الشكلان 14.9 و 14.10 في الوقت $t = 3:00$ مساءً)، فسيكون هناك احتمال معين من الميكانيكا الكمومية -على سبيل المثال، 48 بالمائة- لتتبع المسار (Ca) في الشكل 14.10، واحتمال معين -لنقل أيضًا 48 بالمائة- للمسار (b)، واحتمال معين (أصغر كثيرًا) لكل من المسارات اللانهائية الأخرى المسموح بها كلاسيكيًا. في أي «تجربة»، ستتبع الكرة واحدًا فقط من المسارات التي تسمح بها القوانين الكلاسيكية، ولكن إذا أجرينا عددًا كبيرًا من تجارب كرة البلياردو المتطابقة، ففي 48 بالمائة منها ستتبع الكرة المسار (a)، وفي 48 بالمائة المسار (b)، وهكذا.

وهذا الاستنتاج مُرضٍ إلى حد ما. إنه يشير إلى أن قوانين الفيزياء قد تتكيف مع آلات الزمن بشكل جيد إلى حد ما. هناك مفاجآت، ولكن لا يبدو أن هناك أي توقعات وقحة، وليس هناك ما يشير إلى وجود أي مفارقة غير قابلة للحل. في الواقع، عندما سمعت مجلة ناشيونال إنكويرير بهذا الأمر، أمكنها بسهولة أن تعرض عنواناً رئيسياً: الفيزيائيون يشبثون وجود آلات الزمن. (وبطبيعة الحال، كان هذا النوع من التشويه الوقح هو خوفي المتكرر).

في خريف عام 1988، بعد ثلاثة أشهر من نشر ورقتنا البحثية بعنوان «الثقوب الدودية وآلات الزمن، وحالة الطاقة الضعيفة»، اكتشفها كيني ديفيدسون، وهو مراسل لصحيفة سان فرانسيسكو إكزامينر، في مجلة مراجعة الرسائل الفيزيائية، وفتح القصة.

كان يمكن أن يكون أسوأ من ذلك. على الأقل كان لدى مجتمع الفيزياء ثلاثة أشهر من الهدوء لاستيعاب أفكارنا من دون قصف العناوين المثيرة.

لكن التوهج كان لا يمكن إيقافه. الفيزيائيون يخترعون آلات الزمن، اقرأ عنواناً نموذجياً. حتى إن مجلة كاليفورنيا، في مقال عن «الرجل الذي اخترع السفر عبر الزمن»، نشرت صورة لي وأنا أمارس الفيزياء عارياً على جبل بالومار. لقد شعرت بالخوف - ليس من الصورة، ولكن من الادعاءات الشنيعة تماماً بأنني اخترعت آلات الزمن والسفر عبر الزمن. إذا كانت آلات الزمن، في الواقع، مسموحاً بها بموجب قوانين الفيزياء (وكما سيتضح في نهاية الفصل، وأنا أشك في ذلك)، فمن المحتمل أن تكون أبعد بكثير من القدرات التكنولوجية الحالية للجنس البشري الحالي كما كان السفر إلى الفضاء فوق قدرات رجال الكهف.

وبعد التحدث مع اثنين من المراسلين، تخلت عن كل الجهود المبذولة لوقف هذا المد وسردت القصة بدقة، واختبأت. كان على مساعدي الإداري المحاصر، بات ليون، أن يصد الصحافة بصرامة «يعتقد البروفيسور ثورن أنه من السابق لأوانه في هذا الجهد البحثي إيصال النتائج إلى عامة الناس. عندما يشعر أن لديه فهمًا أفضل عما إذا كانت آلات الزمن محظورة بموجب قوانين الفيزياء أم لا، سيكتب مقالاً يشرح فيه للجمهور». وبهذا الفصل من هذا الكتاب، فإنني أفني بهذا الوعد.

حماية التسلسل الزمني

في فبراير 1989، عندما بدأ الهرج والمرج في الصحافة في التراجع، وبينما كنت أنا وإشفيريا وكلينكهامر نكافح مع مفارقة بولشينسكي، سافرت بالطائرة إلى بوزن، مونتانا، لإلقاء محاضرة. وهناك التقيت ببيل هيسكوك، وهو طالب سابق لدى تشارلز ميسنر. وكما فعلت مع العديد من زملائي، ضغطت على هيسكوك لإبداء آرائه حول الثقوب الدودية وآلات الزمن. كنت أبحث عن انتقادات مقنعة وأفكار جديدة ووجهات نظر جديدة.

قال لي هيسكوك: «ربما ينبغي عليك دراسة تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي. ربما سدمر الثقب الدودي عندما تحاول كائنات لا حدود لتقدمها تحويله إلى آلة زمنية».

دارت في ذهن هيسكوك التجربة الفكرية التي تعود فيها زوجتي كارولي (التي يُفترض أنها تملك تكنولوجيا متقدمة بشكل لا نهائي) إلى الأرض في السفينة الفضائية العائلية بقم ثقب دودي واحد، في حين أجلس أنا على الأرض بالفم الآخر، ويكون الثقب الدودي على وشك أن يصبح آلة الزمن (الشكلان 14.7 و 14.8 أعلاه). كان هيسكوك يتوقع أن تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي قد تنتشر عبر الثقب الدودي بنفس الطريقة التي تتحرك بها أجزاء الإشعاع في الشكل 14.8؛ وبتراكمها على نفسها، قد تصبح التقلبات عنيفة إلى ما لا نهاية وتدمر الثقب الدودي.

كنت متشككًا. قبل ذلك بعام، في أثناء عودتي إلى المنزل من شيكاغو، أقنعت نفسي بأن أجزاء من الإشعاع، التي تنتشر عبر الثقب الدودي، لن تتراكم على نفسها، وتخلق شعاعًا لا نهائيًا من الطاقة، وتدمر الثقب الدودي. من خلال إزالة تركيز الإشعاع، ينقذ الثقب الدودي نفسه. بالتأكيد، اعتقدت أن الثقب الدودي سوف يزيل تركيز الأشعة من تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي وبالتالي ينقذ نفسه.

ومن ناحية أخرى، قلت لنفسني، آلات الزمن هي مفهوم ثوري في الفيزياء بحيث يجب علينا التحقق من أي شيء يملك أدنى فرصة لتدميرها. لذلك، على الرغم من شكوكي، شرعت مع أحد باحثي ما بعد الدكتوراه في مجموعتي، سونج وون كيم، في حساب سلوك تقلبات الفراغ المنتشرة.

ورغم أن الأدوات والأفكار الرياضية التي طورها هيسكوك وديبورا كونكوفسكي قبل بضع سنوات قد ساعدتنا كثيرًا، فقد أعاقتنا أنا وكيم بسبب عدم كفاءتنا. لم يكن أي منا خبيرًا في القوانين الرياضية التي تحكم تقلبات الفراغ المنتشرة: قوانين المجالات الكمومية في الزمكان المنحني (الفصل الثالث عشر). ولكن أخيرًا، في شهر فبراير من عام 1990، وبعد عام كامل من البدايات الخاطئة والأخطاء، اجتمعت حساباتنا وأعطت الإجابة.

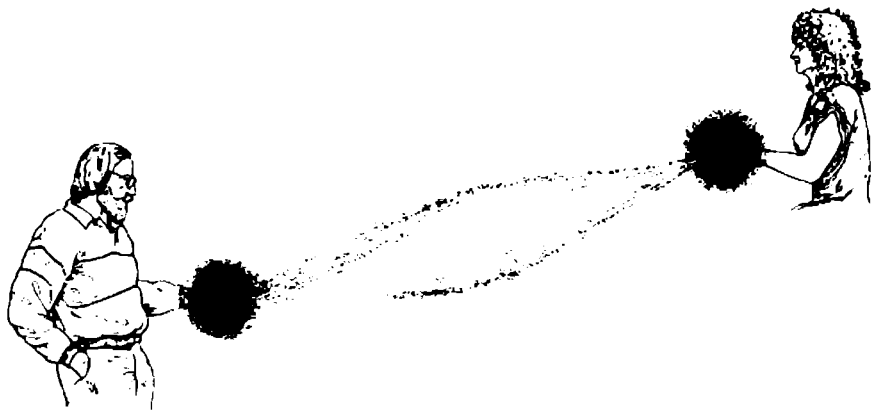
لقد فوجئت وُصِّدمت. وعلى الرغم من محاولة الثقب الدودي إلغاء تركيزها، فإن تقلبات الفراغ مالت إلى إعادة التركيز من تلقاء نفسها (الشكل 14.11). بعد أن ألغى الثقب الدودي تركيزها، انتشرت من الفم على الأرض كما لو أنها ستفقد السفينة الفضائية؛ ثم من تلقاء نفسها، كما لو أن قوة غامضة قد شدتها إليها، قد تركزت على فتحة الثقب

الدودي في مركبة كارولي الفضائية. عند عودتها إلى الأرض من خلال الثقب الدودي، انتشرت بعد ذلك من الفم على الأرض مرة أخرى، وتركزت مرة أخرى على الفم في السفينة الفضائية. لقد كررت هذه الحركة مرارًا وتكرارًا، مكونة شعاعًا مكثفًا من الطاقة المتقلبة.

هل سيكون هذا الشعاع من تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي شديدًا بدرجة كافية لتدمير الثقب الدودي؟ سألنا أنا وكيم نفسينا. لمدة ثمانية أشهر، من فبراير إلى سبتمبر 1990، كنا نكافح مع هذا السؤال. وأخيرًا، بعد عدة تقلبات، استنتجنا (بشكل غير صحيح) «ربما لا». بدأ منطقنا مقنعًا لنا وللعديد من الزملاء، لذا وضعناه في مخطوطة وأرسلناه إلى المراجعات الفيزيائية.

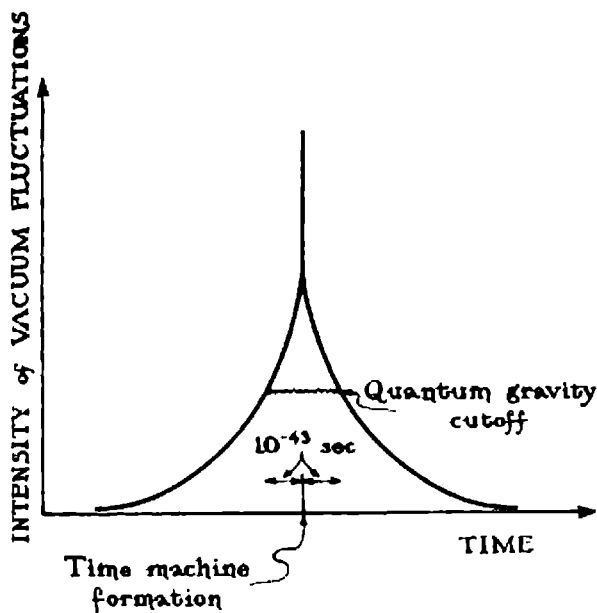
كان منطقنا هو التالي: لقد أظهرت حساباتنا أن تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي المنتشرة تكون شديدة إلى ما لا نهاية فقط لفترة قصيرة من الزمن. تصل إلى ذروتها في اللحظة التي يكون فيها من الممكن لأول مرة استخدام الثقب الدودي للسفر عبر الزمن إلى الماضي (أي في اللحظة التي يصبح فيها الثقب الدودي آلة زمنية لأول مرة)، ثم تبدأ على الفور في التلاشي؛ انظر الشكل 14.12.

الآن، يبدو أن قوانين الجاذبية الكمومية (غير المفهومة) تصر على أنه لا يوجد شيء اسمه «فترة زمنية قصيرة تتلاشى». بدلًا من ذلك، مثلما تجعل تقلبات انحناء الزمكان مفهوم الطول بلا معنى على مقاييس أصغر من طول بلانك-ويلر، 10-33 سنتيمتر (الشكل 14.3 والمناقشة المرتبطة به)، كذلك فإن تقلبات الانحناء يجب أن تجعل مفهوم الزمن بلا معنى على المقاييس. أصغر من 10-43 ثانية («زمن بلانك-ويلر»، وهو يساوي طول بلانك-ويلر مقسومًا على سرعة الضوء). لا يمكن أن توجد فترات زمنية أقصر من هذه، كما يبدو أن قوانين الجاذبية الكمومية تصر على ذلك. إن مفاهيم ما قبل وبعد والتطور مع الزمن ليس لها أي معنى خلال فترات زمنية قصيرة جدًا.



14.11 بينما نحاول أنا وكارولي تحويل الثقب الدودي إلى آلة زمنية بالطريقة الموضحة في الشكل 14.7، تتحرك تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي بين الفتحتين وعبر الثقب الدودي، وتتراكم على نفسها وتخلق شعاعاً من الطاقة المتقلبة الضخمة.

لذلك، اعتقدت أنا وكيم أن تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي المنتشرة يجب أن تتوقف عن التطور مع مرور الزمن؛ أي يجب أن تتوقف عن النمو، قبل 10-43 ثانية من أن يصبح الثقب الدودي آلة زمنية؛ يجب أن تمنع قوانين الجاذبية الكمومية نمو التقلبات. وستسمح قوانين الجاذبية الكمومية للتقلبات بمواصلة تطورها مرة أخرى بعد 10-43 ثانية فقط من ولادة آلة الزمن، وهو ما يعني بعد أن بدأت في التلاشي. وبين هذين الزمنين، لا يوجد زمن ولا يوجد تطور (الشكل 14.12). إذن، كانت القضية الحاسمة هي مدى شدة أشعة التقلبات المتكررة عندما تقطع الجاذبية الكمومية نموها؟ كانت حساباتنا واضحة بيّنة: الشعاع، عندما يتوقف عن النمو، يكون أضعف بكثير من أن يلحق الضرر بالثقب الدودي، وبالتالي، على حد تعبير مخطوطتنا، بدا من المرجح أن «تقلبات الفراغ لا يمكن أن تمنع تكوين أو وجود المنحنيات الشبيهة بالزمن». (المنحنيات المغلقة الشبيهة بالزمن هي مصطلح يستخدمه الفيزيائيون لوصف «آلات الزمن»؛ بعد أن أحرقني الصحافة، توقفت عن استخدام عبارة «آلات الزمن» في أبحاثي؛ ولم تكن الصحافة على دراية بمصطلحات الفيزيائيين، ولم تكن على علم بنتائج آلة الزمن الجديدة التي أنشرها).



14.12 تطور شدة تقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي التي تدور عبر الثقب الدودي قبل وبعد أن يصبح الثقب الدودي آلة زمنية.

في سبتمبر 1990، عندما قدمنا مخطوطتنا إلى مجلة المراجعات الفيزيائية، أرسلنا أنا وكيم نسخًا إلى عدد من الزملاء، بما في ذلك ستيفن هوكينج. قرأ هوكينج مخطوطتنا باهتمام، لكنه اختلف معها. لم يكن لدى هوكينج أي اعتراض على حساباتنا لأشعة تقلبات الفراغ المتكررة (وفي الواقع، كانت حسابات مماثلة أجراها فاليري فرولوف في موسكو قد أثبتت نتائجنا في ذلك الوقت). كان خلاف هوكينج مع تحليلنا لتأثيرات الجاذبية الكمومية.

وافق هوكينج على أن الجاذبية الكمومية من المرجح أن توقف نمو تقلبات الفراغ قبل 10^{-43} ثانية من إنشاء آلة الزمن؛ أي قبل 10^{-43} ثانية من أن تصبح قوة بلا حدود. «لكن 10^{-43} ثانية مقيسة بواسطة من؟ ومن أي إطار مرجعي؟»، سأل هوكينج. الزمن «نسبي» وليس مطلقًا، كما ذكرنا هوكينج؛ يعتمد ذلك على الإطار المرجعي للفرد. لقد افترضنا أنا وكيم أن الإطار المرجعي المناسب هو إطار شخص ما في حالة سكون في حلق الثقب الدودي. جادل هوكينج، بدلًا من ذلك (في الواقع)، باختيار مختلف للإطار المرجعي:

إطار التقلبات نفسها -أو بشكل أكثر دقة، الإطار المرجعي للمراقب الذي يدور بجوار التقلبات، من الأرض إلى السفينة الفضائية وعبر الثقب الدودي بسرعة كبيرة لدرجة أنه يرى المسافة بين الأرض والسفينة الفضائية انكمشت من 10 سنوات ضوئية (10^{19} سنتيمتر) إلى طول بلانك-ويلر (10^{-33} سنتيمتر). يمكن لقوانين الجاذبية الكمومية أن تسيطر على نمو الأشعة وتوقفها لمدة 10^{-43} ثانية فقط قبل أن يصبح الثقب الدودي آلة زمنية، كما يراها هذا المراقب المجاور لتكرارات انتقال الأشعة، كما خمن هو كينج.

بالعودة إلى وجهة نظر مراقب ساكن في الثقب الدودي (المراقب الذي اعتمدنا عليه أنا وكيم)، فإن تخمين هو كينج يعني أن انقطاع الجاذبية الكمومية يحدث قبل 10^{-95} ثانية من أن يصبح الثقب الدودي آلة زمنية، وليس 10^{-43} ثانية. ثانيًا، وبحلول ذلك الزمن، وفقًا لحساباتنا، يكون شعاع الفراغ المتقلب قويًا بدرجة كافية، ولكن بالكاد يكون قويًا، لدرجة أنه قد يدمر الثقب الدودي بالفعل.

كان تخمين هو كينج حول موقع قطع الجاذبية الكمومية مقنعًا. قد يكون على حق، هذا ما استنتجته أنا وكيم بعد الكثير من التأمل؛ وتمكننا من تغيير ورقتنا لنقول ذلك قبل نشرها. ومع ذلك، فإن النتيجة النهائية كانت ملتبسة. حتى لو كان هو كينج على حق، لم يكن من الواضح ما إذا كانت أشعة تقلبات الفراغ ستدمر الثقب الدودي أم لا، ومعرفة ذلك على وجه اليقين تتطلب فهم ما تفعله الجاذبية الكمومية، عندما تثبت في فترة 10^{-95} ثانية، في زمن قريب من تشكيل آلة الزمن.

وبإيجاز، فإن قوانين الجاذبية الكمومية تخفي عنا الإجابة عما إذا كان من الممكن تحويل الثقوب الدودية بنجاح إلى آلات زمنية. لمعرفة الإجابة، يجب علينا نحن البشر أولاً أن نصبح خبراء في قوانين الجاذبية الكمومية.

لدى هو كينج رأي ثابت بشأن آلات الزمن. فهو يعتقد أن الطبيعة تمقتها، وقد جسد هذا البغض في تخمين، وهو حدسية حماية التسلسل الزمني، الذي يقول إن قوانين الفيزياء لا تسمح بآلات الزمن. (يصف هو كينج، في حسه الفكاهي المميز، هذا بأنه تخمين من شأنه أن «يُقي العالم آمنًا للمؤرخين»).

يشك هو كينج في أن الأشعة المتزايدة من تقلبات الفراغ هي طريقة الطبيعة لفرض حماية التسلسل الزمني: كلما حاول المرء صنع آلة زمنية، وبصرف النظر عن نوع الجهاز

الذي يستخدمه في محاولته (ثقب دودي، أسطوانة دوارة¹³ «وتر كوني»¹⁴ أو أي شيء آخر)، قبل أن يصبح جهاز المرء آلة زمنية، سوف تنتشر أشعة من تقلبات الفراغ عبر الجهاز وتدمره. يبدو أن هوكينج مستعد للمراهنة بشدة على هذه النتيجة.

أنا لست على استعداد لاتخاذ الجانب الآخر في مثل هذا الرهان. أنا أستمتع بالمراهنة مع هوكينج، لكن فقط أراهن على أن لديّ فرصة معقولة للفوز. شعوري الغريزي القوي هو أنني سأخسر هذا الرهان. تشير حساباتي الخاصة مع كيم، والحسابات غير المنشورة التي أجرتها إينا فلاناجان (إحدى طالباتي) في الآونة الأخيرة، إلى أن هوكينج من المرجح أن يكون على حق. في كل آلة زمنية احتمال أن تدمر نفسها ذاتياً (عن طريق تعميم تدوير تقلبات الفراغ) في اللحظة التي يحاول فيها المرء تنشيطها. ومع ذلك، لا يمكننا أن نعرف على وجه اليقين حتى يتوصل الفيزيائيون إلى فهم عميق لقوانين الجاذبية الكمومية.

1. لقد اخترت أن أكتب هذا الفصل من وجهة نظري الشخصية فقط. ولذلك فهو أقل موضوعية بكثير من بقية الكتاب، ويمثل أبحاث الآخرين بشكل أقل عدالة وأقل كمالاً مما يمثله بحثي.
2. راجع قسم «أفضل التخمينات» في الفصل الثالث عشر.
3. في اللغة العلمية، نقول إن المادة الغريبة «تنتهك متوسط حالة الطاقة الضعيفة».
4. انظر بشكل خاص الصفحات 347 و 348 و 406 من كتاب Contact لكارل ساجان. هناك يعبر عن الحالة الغريبة (متوسط كثافة الطاقة السلبية كما نراها أشعة الضوء التي تنتقل عبر الثقب الدودي) بطريقة مختلفة ولكن متكافئة: كما يراها شخص ما في حالة سكون داخل الثقب الدودي، يجب أن يكون للمادة توتر كبير، على طول الاتجاه العمودي. وهو توتر أكبر من كثافة مادة الطاقة.
5. الفصل الثالث عشر.
6. طول بلانك-ويلر هو الجذر التربيعي لمساحة بلانك-ويلر (التي دخلت في معادلة إنتروبيا الثقب الأسود، الفصل الثاني عشر)؛ نحصل عليها من خلال الصيغة الرياضية ، حيث $G = 6.670 \times 10^{-8}$ داي-سنتيمتر²/جرام² هو ثابت جاذبية نيوتن، و $h = 1.055 \times 10^{-27}$ إرج-ثانية هو ثابت الميكانيكا الكمومية لبلانك، $c = 2.998 \times 10^{10}$ سنتيمتر/ ثانية هي سرعة الضوء.
7. أتمنى أن أتمكن من رسم صورة بسيطة وواضحة لإظهار كيفية إنشاء هذا الثقب الدودي بسلاسة؛ للأسف لا أستطيع.

8. آلة الزمن هذه وغيرها من الآلات التي سنصفها لاحقاً في هذا الفصل ليست بأي حال من الأحوال أول حلول من نوع آلة الزمن لمعادلة أينشتاين للمجال التي وجدها الناس. في عام 1937، اكتشف ديليو جيه فان ستوكوم في إنديرة حلاً يمثّل في استخدام أسطوانة طويلة لا متناهية تدور بسرعة كآلة زمنية. لقد اعترض الفيزيائيون منذ فترة

طويلة على أنه لا يوجد شيء في الكون يمكن أن يكون طويلًا إلى ما لا نهاية، واشتبهوا (ولكن لم يثبتها أحد) أنه إذا حددت طول الأسطوانة، فإنها لن تكون آلة زمن. في عام 1949، وجد كيرت جودل، من معهد الدراسات المتقدمة في برينستون، نيوجيرسي، حلاً لمعادلة أينشتاين التي تصف الكون بأكمله الذي يدور ولكنه لا يتوسع أو ينكمش، والذي يمكن من خلاله السفر إلى الماضي عبر الزمن بمجرد السفر إلى مسافات هائلة عن الأرض ثم العودة. يعترض الفيزيائيون، بطبيعة الحال، على أن كوننا الحقيقي لا يشبه على الإطلاق حل جودل: فهو لا يدور، على الأقل ليس كثيرًا، وهو يتوسع. في عام 1976، استخدم فرانك تيلر معادلة أينشتاين للمجال لإثبات أنه من أجل إنشاء آلة زمنية في منطقة محدودة الحجم من الفضاء، يجب على المرء استخدام مواد غريبة كجزء من الآلة. (بما أن أي ثقب دودي يمكن عبوره يجب أن يرتبط بمواد غريبة، فإن آلات الزمن المعتمدة على الثقب الدودي الموصوفة في هذا الفصل تلي متطلبات تيلر).

9. في الواقع، إذا تسارعت كارولي إلى سرعة الضوء ثم تراجعت بسرعة كبيرة، فسيكون التسارع كبيرًا لدرجة أنه سيقتلها ويشوه جسدها. ومع ذلك، انطلاقًا من روح التجربة الفكرية لعالم الفيزياء، سأظهر بأن جسدها مصنوع من مادة قوية يمكنها تحمل التسارع بشكل مريح.

10. في معظم أدبيات الخيال العلمي، يُستخدم مصطلح «مفارقة الجد» بدلًا من «مفارقة قتل الأم». من المفترض أن الرجال الشجعان الذين يهيمنون على مهنة كتابة الخيال العلمي يشعرون براحة أكبر في دفع جريمة القتل إلى الوراء قليلًا إضافيًا، وعلى الذكور.

11. أنا وإخوتي الأربعة محترمون للغاية ومطيعون تجاه والدتنا؛ انظر، على سبيل المثال، الحاشية السفلية 2 في الفصل السابع. وبناءً على ذلك، طلبت وحصلت على إذن من والدتي لاستخدام هذا المثال.

12. بعد ثلاث سنوات، تمكن جون فريدمان ومايك موريس معًا من إثبات أنه عندما تنتقل الموجات إلى الماضي عبر الزمن من خلال ثقب دودي، لا توجد بالفعل مفارقات غير قابلة للحل - بشرط أن تتراكم الموجات خطيًا على نفسها بالطريقة المذكورة في الإطار 10.3.

13. انظر الحاشية 8 في الصفحة...

14. اكتشف ريتشارد جوت من جامعة برينستون مؤخرًا أنه يمكن للمرء صنع آلة زمنية عن طريق أخذ وترين كوينين طويلين إلى ما لا نهاية (أجسام افتراضية قد تكون أو لا تكون موجودة في الكون الحقيقي) وتحريكهما أمام بعضهما بسرعة عالية جدًا.

مكتبة

t.me/soramnqraa

الخاتمة

نظرة عامة على تراث أينشتاين، الماضي والمستقبل،
وتحديث حول العديد من الشخصيات المركزية

لقد مر الآن أكثر من قرن كامل منذ أن دمر أينشتاين مفهوم نيوتن للمكان والزمن باعتبارهما مطلقيين، وبدأ في وضع الأسس لإرثه الخاص. على مدى القرن الفاصل، نما إرث أينشتاين ليشمل، من بين أشياء أخرى كثيرة، اعوجاج الزمكان ومجموعة من الأشياء الغريبة المصنوعة كلياً وحصرًا من هذا الاعوجاج: الثقوب السوداء، وموجات الجاذبية، والمفردات (مكسوة وعارية)، والثقوب الدودية، وآلات الزمن.

في حقبة أو أخرى من التاريخ، اعتبر الفيزيائيون أيًا من هذه الأجسام وقاحة.

• لقد التقينا، في هذا الكتاب بشكوك إدينجتون، وويلر، وحتى أينشتاين القوية حول الثقوب السوداء؛ مات إدينجتون وأينشتاين قبل أن يثبت خطأهما بشكل قاطع، لكن ويلر أصبح مناصرًا ومدافعًا عن الثقب الأسود.

• خلال أربعينيات وخمسينيات القرن العشرين، تشكك عدد من علماء الفيزياء -بناءً على تفسيرات خاطئة للرياضيات النسبية العامة التي كانوا يدرسونها- بشأن موجات الجاذبية (تموجات الانحناء) -لكن هذه قصة لكتاب آخر، والشكوك اختفت منذ مدة طويلة.

• لقد كانت صدمة رهيبة لمعظم علماء الفيزياء، ولا تزال للكثيرين، عندما اكتشفوا أن المفردات هي نتيجة حتمية لقوانين النسبية العامة لأينشتاين. يرتاح بعض الفيزيائيين نتيجة الاقتناع بتخمين بنروز للرقابة الكونية (أن جميع المفردات مكسوة، أما المفردات العارية فهي محظورة). ولكن سواء كانت الرقابة الكونية خاطئة أم صحيحة، فقد تكيف معظم الفيزيائيين مع المفردات، ويتوقعون -على شاكلة ويلر- أن تعمل قوانين الجاذبية الكمومية غير المفهومة على ترويضها

-وتحكمها وتحكم فيها بنفس الطريقة التي تحكم بها قوانين نيوتن أو أينشتاين -جاذبية الكواكب، مداراتها حول الشمس.

• يعتبر معظم علماء الفيزياء اليوم الثقوب الدودية وآلات الزمن وقاحة، على الرغم من أن قوانين النسبية العامة لأينشتاين تسمح بوجودهما. ومع ذلك، يمكن للفيزيائيين المتشككين أن يشعروا بالارتياح في معرفتنا الجديدة بأن وجود الثقوب الدودية وآلات الزمن لا تحكم فيه قوانين أينشتاين المتساهلة، بل من خلال القوانين الأكثر تقييداً للمجالات الكمومية في الزمكان المنحني، والجاذبية الكمومية. عندما نفهم هذه القوانين بشكل أفضل، ربما ستعلمنا بشكل قاطع أن القوانين الفيزيائية تحمي الكون دائماً من الثقوب الدودية وآلات الزمن، أو على الأقل -ربما- آلات الزمن.

ماذا نتوقع في القرن القادم، القرن الثاني لإرث أينشتاين (قرننا الحالي)؟

يبدو من المرجح أن الثورة في فهمنا للزمان والأشياء المبنية من اعوجاج الزمكان لن تكون أقل مما كانت عليه في القرن الأول. لقد وضعت بذور الثورة:

• ستجلب لنا أجهزة كشف موجات الجاذبية قريباً خرائط رصد للثقوب السوداء، والأصوات السيمفونية الناتجة عن اصطدام الثقوب السوداء، وهي سيمفونيات مليئة بمعلومات غنية وجديدة حول كيفية سلوك الزمكان المعوج عندما يهتز بشدة. ستحاول عمليات المحاكاة الحاسوبية العملاقة تكرار السيمفونيات وإخبارنا بما تعنيه، وبالتالي ستصبح الثقوب السوداء موضوعات للفحص التجريبي التفصيلي. ماذا سيعلمنا هذا التدقيق؟ ستكون هناك مفاجآت.

• في نهاية المطاف، في القرن القادم، على الأرجح عاجلاً وليس آجلاً، سيكتشف بعض الفيزيائيين الثاقبين ويفهمون أكثر عن قوانين الجاذبية الكمومية، بكل تفاصيلها الدقيقة.

• وجود قوانين الجاذبية الكمومية هذه، قد يمكّننا من معرفة كيفية نشوء الزمكان في الكون بدقة، وكيف نشأ من الرغبة الكمومية وزيد مفردة الانفجار الأعظم. قد نتعلم يقيناً معنى أو (انعدام معنى) السؤال الذي كثيراً ما يُطرح: «ما الذي سبق الانفجار الأعظم؟». قد نتعلم على وجه اليقين ما إذا كانت الرغبة الكمومية تنتج

أكوانًا متعددة بسهولة، والتفاصيل الكاملة عن كيفية تدمير الزمكان في المفردة الموجودة في قلب الثقب الأسود أو في الانسحاق العظيم، وكيف، وما إذا كان سينشأ الزمكان وأين، مرة أخرى. وقد نتعلم ما إذا كانت قوانين الجاذبية الكمومية تسمح بآلات الزمن أو تحرّمها: هل يجب على آلات الزمن أن تدمر نفسها دائمًا في لحظة تفعيلها؟

• ليست قوانين الجاذبية الكمومية هي المجموعة النهائية من القوانين الفيزيائية على امتداد الطريق الذي أدى من نيوتن إلى النسبية الخاصة، إلى النسبية العامة والنظرية الكمومية، ومن ثم إلى الجاذبية الكمومية. ولا يزال يتعين على قوانين الجاذبية الكمومية أن تكون مرتبطة (موحدة مع) بالقوانين التي تحكم القوى الأساسية الأخرى في الطبيعة: القوة الكهرومغناطيسية، والقوة النووية الضعيفة، والقوة النووية القوية. وربما سنتعرف على تفاصيل هذا التوحيد في القرن القادم - ومرة أخرى، عاجلاً وليس آجلاً على الأرجح؛ وهذا التوحيد قد يغير نظرتنا للكون بشكل جذري. وماذا بعد؟ لا يمكن لأي إنسان اليوم أن يتنبأ بما هو أبعد من تلك النقطة، ومع ذلك - على ما أعتقد - فإن هذه النقطة قد تحدث في حياتي، وفي حياتك.

في نهاية نوفمبر 1993

ألبرت أينشتاين قضى معظم سنواته الخمس والعشرين الأخيرة في مسعى غير مثمر لتوحيد قوانين النسبية العامة للفيزياء مع قوانين ماكسويل للكهرومغناطيسية؛ ولم يكن يعلم أن التوحيد الأهم هو مع الميكانيكا الكمومية. توفي في برينستون، نيو جيرسي عام 1955 عن عمر يناهز السادسة والسبعين.

سابرامانين تشاندراسخار، البالغ من العمر الآن ثلاثة وثمانين عامًا، يواصل استكشاف أسرار معادلة المجال لأينشتاين، وغالبًا ما يكون ذلك بالتعاون مع زملاء أصغر منه سنًا. لقد علمنا في السنوات الأخيرة الكثير عن نبضات النجوم وتصادمات موجات الجاذبية. فريتز زفيكي أصبح أقل انتماءً للفيزياء النظرية وأكثر تخصصًا في علم الفلك مع تقدمه في السن؛ واستمر في إنتاج أفكار مثيرة للجدل، ولكن ليس حول موضوعات هذا

الكتاب. تقاعد من منصبه كأستاذ في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا في عام 1968 وانتقل إلى سويسرا، حيث أمضى سنواته الأخيرة في الترويج لمساره الداخلي نحو المعرفة: «الطريقة المورفولوجية». توفي عام 1974.

ليف دافيدوفيتش لاندوا تعافى فكريًا، ولكن ليس عاطفيًا، من السنة التي قضاها في السجن (1938-1939)، ثم واصل عمله باعتباره الشخصية المهيمنة والمعلم الأكثر احترامًا بين علماء الفيزياء النظرية السوفيتية. في عام 1962، أصيب بجروح خطيرة في حادث سيارة، مما أدى إلى إصابته بتلف في الدماغ غير شخصيته ودمر قدرته على ممارسة الفيزياء. توفي عام 1968، لكن أقرب أصدقائه قالوا عنه بعد ذلك: «بالنسبة إليّ، توفي داو عام 1962».

ياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيتش ظل أكثر علماء الفيزياء الفلكية تأثيرًا في العالم خلال السبعينيات وحتى الثمانينيات. ومع ذلك، في عام 1978، وفي خلاف مأساوي، انفصل عن معظم مجموعته البحثية (أقوى فريق من علماء الفيزياء الفلكية النظرية شهده العالم على الإطلاق). لقد حاول إعادة البناء مع مجموعة جديدة من زملائه الشباب، لكنه لم ينجح إلا جزئيًا، ثم في الثمانينيات أصبح معلمًا لعلماء الفيزياء الفلكية وعلماء الكون في جميع أنحاء العالم. توفي بنوبة قلبية في موسكو عام 1987، بعد فترة وجيزة من التغييرات السياسية التي أجراها جورباتشوف والتي أتاحت له السفر إلى أمريكا للمرة الأولى.

إيجور دميترييفيتش نوفيكوف أصبح قائدًا لمجموعة أبحاث زيلدوفيتش/ نوفيكوف بعد الانفصال عن زيلدوفيتش. خلال الثمانينيات، جمع المجموعة معًا بنفس النوع من النار والتحفيز الذي حشده زيلدوفيتش في الأيام الخوالي. ومع ذلك، من دون زيلدوفيتش، كانت مجموعته من بين الأفضل في العالم، ولم تكن متقدمة كثيرًا عن الجميع، كما كانت من قبل. مع انهيار الاتحاد السوفيتي عام 1991، وبعد إجراء عملية جراحية في القلب جعلته يشعر بمحدودية قدراته، انتقل نوفيكوف إلى جامعة كوبنهاجن في الدنمارك، حيث أنشأ مركزًا جديدًا للفيزياء الفلكية النظرية.

فيتالي لازاريفيتش جينزبرج، البالغ من العمر سبعة وسبعين عامًا، يواصل إجراء أبحاث رائدة في العديد من فروع الفيزياء والفيزياء الفلكية المختلفة. في أثناء نفي أندريه ساخاروف إلى جوركي في 1980-1986، رفض جينزبرج، باعتباره «الرئيس»

الرسمي لساخاروف في معهد ليبيديف في موسكو، طرده وعمل كنوع من الحماية. في ظل البيريسترويكا التي فرضها جورباتشوف، كان كل من جينزبرج وساخاروف عضوين منتخبين في مجلس نواب الشعب في اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية، حيث ضغطا من أجل الإصلاح. توفي ساخاروف بنوبة قلبية في عام 1989.

روبرت أوبنهايمر، على الرغم من رفض حكومة الولايات المتحدة له في جلسات الاستماع الخاصة بالتصريح الأمني عام 1954، أصبح بطلاً بالنسبة إلى أغلبية مجتمع الفيزياء. لم يعد قُط إلى البحث، لكنه ظل على اتصال وثيق بمعظم فروع الفيزياء تقريباً، وكان بمثابة غطاء قوي للفيزيائيين الشباب حموا تحته أفكارهم، حتى وفاته بمرض السرطان في عام 1967.

جون ويلر، البالغ من العمر اثنين وثمانين عاماً، يواصل سعيه لفهم التزاوج بين الميكانيكا الكمومية والنسبية العامة، ويستمر في إلهام الأجيال الشابة بمحاضراته وكتاباته، وأبرزها كتابه الأخير رحلة إلى الجاذبية والزمكان (ويلر، 1990).

روجر بنروز، مثل ويلر وآخرين، مهووس بالزواج بين النسبية العامة والميكانيكا الكمومية وقوانين الجاذبية الكمومية غير المفهومة والتي ينبغي أن تنبثق من هذا الزواج. وقد كتب عن أفكاره غير التقليدية في كتاب لغير الفيزيائيين (عقل الإمبراطور الجديد، بنروز، 1989). العديد من الفيزيائيين يشككون في وجهات نظره، لكن بنروز كان على حق في مرات عديدة من قبل...

ستيفن هوكينج لا يزال أيضاً مهووساً بقوانين الجاذبية الكمومية، وعلى الأخص بمسألة ما تتنبأ به تلك القوانين حول أصل الكون. مثل بنروز، كتب كتاباً لغير الفيزيائيين، يصف فيه أفكاره (تاريخ موجز للزمن، هوكينج، 1988). صحته جيدة رغم إصابته بمرض التصلب الجانبي الضموري.

شكر وتقدير

ديون الامتنان للأصدقاء والزملاء
الذين أثروا في هذا الكتاب

إلين هوكس واتسون، بفضلها اللا محدود حول الكون، ألهمتي للشروع في هذا الكتاب. خلال خمسة عشر عامًا من الكتابة المتقطعة، تلقيت تشجيعًا ودعمًا لا يقدران بثمن من العديد من الأصدقاء المقربين وعائلي: ليندا ثورن، وكاريس ثورن، وبريت ثورن، وأليسون ثورن، وإستيل جريجوري، وبوني شوماكر، وعلى الأخص زوجتي كارولي، وينشتاين.

أنا مدين لعدد من زملائي الفيزيائيين والفيزيائيين الفلكيين وعلماء الفلك، الذين وافقوا على إجراء مقابلة معي على أشرطة كاسيت حول ذكرياتهم عن الأحداث التاريخية والجهود البحثية الموصوفة في هذا الكتاب. تظهر أسماءهم في قائمة المقابلات المسجلة في بداية قائمة المراجع.

أربعة من زملائي، فلاديمير براجينسكي، وستيفن هوكينج. وفيرنر إسرائيل، وكارل ساجان، كانوا لطفاء بما يكفي لقراءة المخطوطة بأكملها وإعطائي انتقادات مفصلة. قرأ العديد من الآخرين فصولاً فردية أو عدة فصول ووجهوني إلى تفاصيل تاريخية وعلمية مهمة: فلاديمير بيلينسكي، وروجر بلاندفورد، وكارلتون كيفز، ودينيس سياما، وروبرت سيربر، وروبرت سبيرو، وأليكسي ستاروبينسكي، وروشوس فوجت، وروبرت والد، وجون ويلر، وياكوف بوريسوفيتش زيلدوفيتش. ومن دون نصيحة هؤلاء الزملاء، سيكون الكتاب أقل دقة بكثير مما هو عليه الآن. ومع ذلك، لا ينبغي للمرء أن يفترض أن زملائي يتفقون معي أو يوافقون على كل تفسيراتي لتاريخنا المشترك. حتمًا كانت هناك بعض الصراعات في وجهات النظر. في النص -ومن أجل أصول التدريس- ألتمز بوجهة نظري

الخاصة (في كثير من الأحيان، ولكن ليس دائماً، متأثراً بشكل كبير بانتقادات زملائي). في الملاحظات، من أجل الدقة التاريخية، أكشف عن بعض الصراعات.

مزقت ليندا أوبست معظم النسخة الأولى من الكتاب. أشكرها. مزق كول النسخة الثانية إلى أشلاء ثم أعطاني بصبر نصيحة حاسمة حول المسودة تلو المسودة، حتى تحسن العرض التقديمي. إلى كول أدين بشكل خاص. وأشكر أيضاً ديبورا ماكاي على تنظيف المخطوطة النهائية بدقة؛ إنها تسعى إلى الكمال أكثر مني.

تحسن الكتاب بشكل ملحوظ من خلال انتقادات العديد من القراء غير الفيزيائيين: لودميلا (ليلي) بيرلادينو، ودوريس دريكر، وليندا فيرمان، وريبكا لويث وايت، وبيتر ليتمان، وديانا ميتزجر، وريتشمان، وباري ثورن، وأليسون ثورن، وكارولي وينشتاين. أشكرهم، وأشكر هيلين كنودسن على تحديد عدد من المراجع والحقائق -بعضها غامض بشكل لا يمكن تخيله.

لقد كنت محظوظاً بمشاهدة رسومات ماثيو زيميت المبهجة في كتاب هاينز باجيل «الشفرة الكونية»، وأغريته لتنفيذ الرسوم التوضيحية لكتابي أيضاً. رسومه التوضيحية أضافت الكثير.

أخيراً، أود أن أشكر برنامج كتاب صندوق الكومنولث، وخاصة ألكسندر بيرن وأنتونينا ديليو بوي، وأيضاً إد باربر من نورتون وشركاه، لدعمهم وصبرهم وإيمانهم بي ككاتب خلال السنوات التي استغرقها إنجاز هذا الكتاب.

الشخصيات

قائمة الشخصيات الذين يظهرون بشكل ملحوظ
في عدة أماكن مختلفة من الكتاب

ملحوظة: الأوصاف التالية بمثابة تذكير وإشارات مرجعية للمظاهر المختلفة لكل شخص في هذا الكتاب. ليس المقصود من هذه الأوصاف أن تكون رسمًا للسيرة الذاتية. (معظم هؤلاء الأشخاص قدموا مساهمات كبيرة في العلوم التي لا علاقة لها بهذا الكتاب، وبالتالي لم تذكر هنا). المعيار الرئيسي للتضمن في هذا القسم ليس أهمية المساهمات، بل الظهور المتكرر للشخص في عدة مواقع مختلفة داخل الكتاب.

بادي، والتد (1893-1960). ألماني المولد، عالم فلك بصري أمريكي. طور مع زفيكي مفهوم المستعر الأعظم وارتباطه بالنجوم النيوترونية (الفصل الخامس)؛ حددت المجرات المرتبطة بمصادر الراديو الكونية (الفصل التاسع).

باردين، جيمس ماكسويل (ولد في 1939). عالم فيزياء نظرية أمريكي. أظهر أن العديد أو معظم الثقوب السوداء في كوننا يجب أن تدور بسرعة، وتنبأ، مع بيترسون، بتأثير دوران الثقوب على الأقراص التراكمية المحيطة (الفصل التاسع)؛ اكتشف مع كارتر وهوكينج القوانين الأربعة لميكانيكا الثقب الأسود (قوانين تطور الثقوب السوداء) (الفصل الثاني عشر).

بيكنشتاين، جاكوب (ولد في 1947). عالم فيزياء نظرية إسرائيلي؛ طالب ويلر. مع هارتل، أظهر أنه لا يمكن للمرء أن يميز، من خلال أي دراسة خارجية للثقب الأسود، ما هي أنواع الجسيمات الموجودة بين المواد التي شكلتها (الفصل السابع)؛ اقترح أن مساحة سطح الثقب الأسود هي إنتروبيا مقنعة، وواصل معركة مع هوكينج حول هذه الفكرة، وفاز في النهاية (الفصل الثاني عشر).

بور، نيلز هندريك ديفيد (1885-1962). عالم فيزياء نظرية دنماركي؛ حائز جائزة نوبل؛ أحد مؤسسي الميكانيكا الكمومية؛ ومعلم للعديد من علماء الفيزياء البارزين في منتصف القرن العشرين، بما في ذلك ليف لاندau وجون ويلر؛ نصح تشاندراسخار في معركته مع إدينجتون (الفصل الرابع)؛ حاول إنقاذ لاندau من السجن (الفصل الخامس)؛ طور مع ويلر نظرية الانشطار النووي (الفصل السادس).

براجينسكي، فلاديمير بوريسوفيتش (ولد في 1931). عالم فيزياء تجريبي روسي؛ واكتشف حدود الميكانيكا الكمومية لدقة القياسات الفيزيائية، بما في ذلك أجهزة كشف موجات الجاذبية (الفصل العاشر)؛ مخترع مفهوم الأجهزة «اللا هدمية الكمومية»، التي تتحايل على تلك الحدود الكمومية (الفصل العاشر).

كارتر، براندون (ولد في 1942). عالم فيزياء نظرية أسترالي؛ طالب لدى دينيس سياما في كامبريدج، إنجلترا؛ انتقل بعد ذلك إلى فرنسا؛ وأوضح خصائص الثقوب السوداء الدوارة (الفصل السابع)؛ وأثبت مع آخرين أن الثقب الأسود ليس له شعر (الفصل السابع)؛ اكتشف مع باردين وهوكنج القوانين الأربعة لميكانيكا الثقب الأسود (قوانين تطور الثقوب السوداء) (الفصل الثاني عشر).

تشاندراسخار، سابرامانين (ولد في 1910). هندي المولد، عالم فيزياء فلكية أمريكي. حائز جائزة نوبل؛ أثبت أن هناك حدًا أقصى لكتلة النجوم القزمة البيضاء وخاض معركة مع إدينجتون حول صحة تنبؤاته (الفصل الرابع)؛ طور الكثير من النظرية حول كيفية استجابة الثقوب السوداء للتقلبات الصغيرة (الفصل السابع).

إدينجتون، آرثر ستانلي (1882-1944). عالم الفيزياء الفلكية البريطاني. الرائد في وقت مبكر من قوانين النسبية العامة لأينشتاين (الفصل الثالث)؛ كان معارضًا قويًا لمفهوم الثقب الأسود ولاستنتاج تشاندراسخار بأن الأقزام البيضاء لها كتلة قصوى (الفصلان الثالث والرابع).

أينشتاين ألبرت (1879-1955). ألماني المولد، فيزيائي نظري سويسري/ أمريكي؛ حائز جائزة نوبل؛ صاغ قوانين النسبية الخاصة (الفصل الأول) والنسبية العامة (الفصل الثاني)؛ وأظهر أن الضوء هو جسيم وموجة في نفس الوقت (الفصل الرابع)؛ عارض مفهوم الثقب الأسود (الفصل الثالث).

جيروش، روبرت (ولد في 1942). عالم فيزياء نظرية أمريكي. طالب ويلر. وطور مع آخرين طرقًا شاملة/عالمية لتحليل الثقوب السوداء (الفصل الثالث عشر)؛ أظهر أن طوبولوجيا الفضاء يمكن أن تتغير (على سبيل المثال، عندما يتشكل ثقب دودي) فقط إذا استخدمت آلة زمنية في هذه العملية (الفصل الرابع عشر)؛ مع والد، قدم الحجة الأولى التي تشير إلى أن آلات الزمن قد تدمر كلما حاولت التشكل (الفصل الرابع عشر).

جياكوني، ريكاردو (ولد في 1931). إيطالي المولد، فيزيائي تجريبي وعالم فيزياء فلكية أمريكي؛ قاد الفريق الذي اكتشف أول نجوم الأشعة السينية، في عام 1962، باستخدام كاشف محمول على صاروخ (الفصل الثامن)؛ قاد الفريق الذي صمم وبنى قمر أوهورو للأشعة السينية، والذي أنتج أول دليل قوي من الأشعة السينية على أن الدجاجة س1- عبارة عن ثقب أسود (الفصل الثامن).

جينزبرج، فيتالي لازاريفيتش (ولد في 1916). عالم فيزياء نظرية سوفيتي. اخترع وقود LiD للقبلة الهيدروجينية السوفيتية ثم فصل عن مشروع القبلة (الفصل السادس)؛ تعاون مع لاندau بتطوير شرح لأصل التوصيلية الفائقة (الفصلان السادس والتاسع)؛ اكتشف أول دليل على أن الثقب الأسود ليس له شعر (الفصل السابع)؛ طور تفسير إشعاع السنكروترون لأصل موجات الراديو الكونية (الفصل التاسع).

جرينشتاين، جيسي (ولد في 1909). عالم الفلك البصري الأمريكي. زميل زفيكي (الفصل الخامس)؛ مع فريد ويبل وجد أنه من المستحيل تفسير موجات الراديو الكونية (الفصل التاسع)؛ أدى إلى بداية الجهود البحثية الأمريكية في علم الفلك الراديوي (الفصل التاسع)؛ اكتشف النجوم الزائفة مع مارتن شميدت (الفصل التاسع).

هارتل، جيمس (ولد في 1939). طالب ويلر. ومع بيكنشتاين، أظهر أنه لا يمكن للمرء، من خلال أي دراسة خارجية للثقب الأسود، أن يميز أنواع الجسيمات الموجودة بين المواد التي شكلته (الفصل السابع)؛ اكتشف مع هوكينج القوانين التي تحكم تطور أفق الثقب الأسود (الفصل الثاني عشر)؛ تطور مع هوكينج رؤى حول قوانين الجاذبية الكمومية (الفصل الثالث عشر).

هوكينج، ستيفن (ولد في 1942). عالم فيزياء نظرية بريطاني. طالب سياما. وطور أجزاء رئيسية من الدليل على أن الثقب الأسود ليس له شعر (الفصل السابع)؛ اكتشف مع

باردين وكارتر القوانين الأربعة لميكانيكا الثقب الأسود (قوانين تطور الثقوب السوداء) (الفصل الثاني عشر)؛ اكتشف أنه إذا تجاهل المرء قوانين الميكانيكا الكمومية، فإن المساحات السطحية للثقوب السوداء لا يمكن إلا أن تزايد، لكن الميكانيكا الكمومية تجعل الثقوب السوداء تتبخر وتقلص (الفصل الثاني عشر)؛ أظهر أن الثقوب السوداء الصغيرة يمكن أن تكون قد تشكلت في الانفجار الأعظم، ومع بايج، وضعاً حدوداً لرصد مثل هذه الثقوب البدائية بناءً على عدم رؤية علماء الفلك لأشعة جاما الناتجة عن تبخرها (الفصل الثاني عشر)؛ طور طرقاً عالمية (طوبولوجية) لتحليل الثقوب السوداء (الفصل الثالث عشر)؛ مع بنروز، أثبت أن الانفجار الأعظم يحتوي على مفردة (الفصل الثالث عشر)؛ صاغ تخمين حماية التسلسل الزمني وجادل بصحة الفرضية التي تقول إن تقلبات الفراغ تدمر أي آلة زمنية في لحظة إنشائها (الفصل الرابع عشر)؛ راهن مع كيب ثورن حول ما إذا كان الدجاجة س1 - عبارة عن ثقب أسود (الفصل الثامن) وما إذا كان من الممكن أن تتشكل المفردات العارية في كوننا (الفصل الثالث عشر).

إسرائيل، فيرنر (ولد في 1931). ولد في جنوب إفريقيا، وهو عالم فيزياء نظرية كندي؛ أثبت أن كل ثقب أسود غير دوار يجب أن يكون كروياً، وقدم دليلاً على أن الثقب الأسود يفقد «شعره» عن طريق إطلاق إشعاعه بعيداً (الفصل السابع)؛ اكتشف أن المساحات السطحية للثقوب السوداء لا يمكن إلا أن تزايد، لكنه لم يدرك أهمية هذا الاستنتاج (الفصل الثاني عشر)؛ أظهر مع بواسون وأوري أن قوى المد والجزر التي تحيط بمفردة الثقب الأسود تصبح أضعف مع تقدم عمر الثقب (الفصل الثالث عشر)؛ طور رؤى حول التاريخ المبكر لأبحاث الثقوب السوداء (الفصل الثالث).

كير، روي (ولد في 1934). عالم الرياضيات النيوزيلندي. اكتشف حل معادلة المجال لأينشتاين، التي تصف الثقب الأسود الدوار: «حل كير» (الفصل السابع).

لاندوا، ليف دافيدوفيتش (1908-1968). عالم فيزياء نظرية سوفيتي. حائز جائزة نوبل؛ نقل الفيزياء النظرية من أوروبا الغربية إلى الاتحاد السوفيتي في ثلاثينيات القرن العشرين (الفصلان الخامس والثالث عشر)؛ حاول تفسير الحرارة النجمية على أنها تنتج عن المواد النجمية التي يلتقطها القلب النيوتروني في مركز النجم، وبالتالي أدى ذلك إلى إطلاق بحث أوبنهايمر حول النجوم النيوترونية والثقوب السوداء (الفصل الخامس)؛ سجن في إرهاب ستالين العظيم ثم أطلق سراحه حتى يتمكن من تطوير نظرية الميوعة

الفائقة (الفصل الخامس)؛ ساهم في أبحاث الأسلحة النووية السوفيتية (الفصل السادس).

لابلاس، بيير سيمون (1749-1827). الفيلسوف الطبيعي الفرنسي. طور ونشر مفهوم النجم المظلم (الثقب الأسود) وفقاً لقوانين نيوتن الفيزيائية (الفصلان الثالث والسادس).

لورنتز، هندريك أنطون (1853-1928). عالم فيزياء نظرية هولندي؛ حائز جائزة نوبل؛ وطور أسساً أساسية لقوانين النسبية الخاصة، وأهمها قانون لورنتز-فيتزجيرالد للانكماش وتمدد الزمن (الفصل الأول)؛ صديق وشريك لأينشتاين عندما كان أينشتاين يطور قوانين النسبية العامة للفيزياء (الفصل الثاني).

ماكسويل، جيمس كليرك (1831-1879). عالم فيزياء نظرية بريطاني. طور قوانين الكهرباء والمغناطيسية (الفصل الأول).

ميشيل، جون (1724-1793). الفيلسوف الطبيعي البريطاني. طور ونشر مفهوم النجم المظلم (الثقب الأسود) وفقاً لقوانين نيوتن الفيزيائية (الفصلان الثالث والسادس).

مايكلسون، ألبرت أبراهام (1852-1931). ألماني المولد، عالم فيزياء تجريبي أمريكي. حائز جائزة نوبل؛ اخترع تقنيات قياس التداخل (الفصل الأول)؛ استخدم هذه التقنيات ليكتشف أن سرعة الضوء مستقلة عن سرعة الإنسان عبر الكون (الفصل الأول).

مينكوفسكي، هيرمان (1864-1909). عالم فيزياء نظرية ألماني. معلم أينشتاين (الفصل الأول)؛ اكتشف أن المكان والزمان متحدان في الزمكان (الفصل الثاني).

ميسنر، تشارلز (ولد في 1932). عالم فيزياء نظرية أمريكي. طالب ويلر. طور وصفاً تخطيطياً مضمناً لكيفية إنتاج نجم متفجر لثقب أسود (الفصل السادس)؛ أنشأ مجموعة بحثية ساهمت بشكل كبير في «العصر الذهبي» لأبحاث الثقوب السوداء (الفصل السابع)؛ اكتشف أن الموجات الكهرومغناطيسية وغيرها التي تنتشر بالقرب من ثقب أسود يلف محورياً يمكنها استخلاص الطاقة الدورانية من الثقب واستخدامها لتضخيم نفسها (الفصل الثاني عشر)؛ اكتشف تذبذبات «مضرب البيض / ماكماستر» للمد والجزر بفعل الجاذبية بالقرب من المفردات (الفصل الثالث عشر).

نيوتن، إسحاق (1642-1727). الفيلسوف الطبيعي البريطاني. طور أسس قوانين فيزياء نيوتن ومفهوم المكان والزمن باعتبارهما مطلقين (الفصل الأول)؛ طور قوانين جاذبية نيوتن (الفصل الثاني).

نوفيكوف، إيجور دميترييفيتش (ولد في 1935). عالم فيزياء نظرية وعالم فيزياء فلكية سوفيتي؛ طالب زيلدوفيش. مع دوروشكيفيتش وزيلدوفيش، طوراً بعض الأدلة الأولية الرئيسية على أن الثقب الأسود ليس له شعر (الفصل السابع)؛ اقترح مع زيلدوفيش طريقة البحث الفلكي عن الثقوب السوداء في مجرتنا والتي يبدو أنها نجحت أخيراً (الفصل الثامن)؛ طور مع ثورن نظرية هياكل الأقراص التراكمية حول الثقوب السوداء (الفصل الثاني عشر)؛ وتوقع دوروشكيفيتش أن قوى المد والجزر داخل الثقب الأسود يجب أن تتغير مع تقدم عمر الثقب (الفصل الثالث عشر)؛ أجرى بحثاً حول ما إذا كانت قوانين الفيزياء تسمح بآلات الزمن (الفصل الرابع عشر).

أوبنهايمر، روبرت (1904-1967). عالم فيزياء نظرية أمريكي. نقل الفيزياء النظرية من أوروبا الغربية إلى الولايات المتحدة في ثلاثينيات القرن العشرين (الفصل الخامس)؛ مع سيربر، دحض ادعاء لاندau بأن النجوم قد تظل ساخنة بواسطة القلوب النيوترونية، ومع فولكوف، أثبت أن هناك أقصى كتلة ممكنة للنجوم النيوترونية (الفصل الخامس)؛ أظهر مع سنيدر، في نموذج مثالي للغاية، أنه عندما تموت النجوم الضخمة، يجب أن تنفجر لتشكل ثقباً سوداء، وأوضح السمات الرئيسية للانفجار الداخلي (الفصل السادس)؛ قاد مشروع القنبلة الذرية الأمريكية، وعارض مشروع القنبلة الهيدروجينية في وقت مبكر ثم أيدته وخسر تصريحه الأمني (الفصل السادس)؛ خاض معركة مع ويلر حول ما إذا كان الانفجار الداخلي ينتج ثقباً سوداء (الفصل السادس).

بنروز، روجر (ولد في 1931). عالم الرياضيات والفيزياء النظرية البريطاني. أحد طلاب سياما؛ وتكهن بأن الثقوب السوداء تفقد شعرها عن طريق بثق إشعاعها بعيداً (الفصل السابع)؛ اكتشف أن الثقوب السوداء الدوارة تخزن كميات هائلة من الطاقة في دوامة الفضاء خارج آفاقها وأن هذه الطاقة يمكن استخراجها (الفصل السابع)؛ طور مفهوم الأفق الظاهري للثقب الأسود (الفصلان الثاني عشر والثالث عشر)؛ اكتشف أن المساحات السطحية للثقوب السوداء لا بد أن تزيد، لكنه لم يدرك أهمية هذا الاستنتاج (الفصل الثاني عشر)؛ اخترع وطور طرقاً عالمية (طوبولوجية) لتحليل الثقوب السوداء (الفصل الثالث عشر)؛ أثبت أن الثقوب السوداء لا بد أن تكون لها مفردات في مراكزها، وأثبت، مع هوكينج، أن الانفجار الأعظم احتوى على مفردات (الفصل الثالث عشر)؛

اقترح حدسية الرقابة الكونية، بأن قوانين الفيزياء تمنع المفردات العارية من التشكل في كوننا (الفصل الثالث عشر).

بريس، ويليام (ولد في 1948). عالم فيزياء نظرية وعالم فيزياء فلكية أمريكي؛ طالب لدى ثورن. أثبت مع تيوكولسكي أن الثقوب السوداء مستقرة ضد التقلبات الصغيرة (الفصلان السابع والثاني عشر)؛ اكتشف أن الثقوب السوداء يمكن أن تنبض (الفصل السابع)؛ نظم جنازة العصر الذهبي لأبحاث الثقوب السوداء (الفصل السابع).

بريس، ريتشارد (ولد في 1943). عالم فيزياء نظرية وعالم فيزياء فلكية أمريكي؛ طالب لدى ثورن. أعطى دليلاً قاطعاً على أن الثقب الأسود يفقد شعره عن طريق إطلاق إشعاع الشعر بعيداً، وأثبت أن أي شيء يمكن أن يشع سوف يشع بعيداً تماماً (الفصل السابع)؛ وجد أدلة على أن الثقوب السوداء تنبض ولكنه لم يتعرف على أهميتها (الفصل السابع)؛ وطور مع آخرين النموذج الغشائي للثقوب السوداء (الفصل الحادي عشر)؛ كان قلقاً بشأن سلامة ثورن العقلية عندما بدأ ثورن بحثاً عن آلات الزمن (الفصل الرابع عشر).

ريس، مارتن (ولد في 1942). عالم الفيزياء الفلكية البريطاني. طالب لدى سياما. نماذج مطورة تشرح السمات الرصدية للأنظمة الثنائية التي يراكم فيها الثقب الأسود الغاز من نجم مرافق (الفصل الثامن)؛ اقترح أن الفصوص العملاقة للمجرة الراديوية مدعومة بحزم من الطاقة التي تنتقل من قلب المجرة إلى الفصوص، ومع بلاندفورد طور نماذج مفصلة للحزم (الفصل التاسع)؛ بالتعاون مع بلاندفورد وآخرين، طوروا نماذج تشرح كيف يمكن للثقب الأسود الهائل أن ينشط المجرات الراديوية، والنجوم الزائفة، والأقنوية المجرية النشطة (الفصل التاسع).

ساخاروف، أندريه دميترييفيتش (1921-1989). عالم فيزياء نظرية سوفيتي. اخترع الأفكار الرئيسية التي تكمن وراء القنبلة الهيدروجينية السوفيتية (الفصل السادس)؛ صديق مقرب وشريك ومنافس لزيلدوفيتش (الفصلان السادس والسابع)؛ أصبح فيما بعد المنشق السوفيتي الرائد، وبعد الجلاسنوست، القديس السوفيتي.

شفارتسشيلد، كارل (1876-1916). عالم الفيزياء الفلكية الألماني. اكتشف حل شفارتسشيلد لمعادلة أينشتاين للمجال، والذي يصف هندسة الزمكان لنجم غير دوار يكون إما ثابتاً أو متفجراً داخلياً، ويصف أيضاً ثقباً أسود غير دوار (الفصل الثالث)؛

اكتشف حل معادلة أينشتاين للجزء الداخلي من نجم ثابت الكثافة، وهو الحل الذي استخدمه أينشتاين ليجادل بأن الثقوب السوداء غير ممكنة (الفصل الثالث).

سياما، ديفيس (ولد في 1926). عالم فيزياء فلكية بريطاني ومرشد للباحثين البريطانيين في مجال الثقوب السوداء (الفصلان السابع والثالث عشر).

تيوكولسكي، سائل (ولد في 1947). ولد في جنوب إفريقيا، وهو عالم فيزياء نظرية أمريكي. طالب لدى ثورن. اخترع وطور الشكليات التي تحلل تقلبات الثقوب السوداء الدوارة، واستخدم مع بريس شكليته لإظهار أن الثقوب السوداء مستقرة ضد التقلبات الصغيرة (الفصلان السابع والثاني عشر)؛ اكتشف مع شابير ودليلاً على أن قوانين الفيزياء قد تسمح بتشكيل مفردات عارية في كوننا (الفصل الثالث عشر).

ثورن، كيب (ولد في 1940). عالم فيزياء نظرية أمريكي. طالب لدى ويلر. اقترح حدسية الطوق الذي يصف متى يمكن أن تتشكل الثقوب السوداء في نجم متفجر، وطور أدلة على ذلك (الفصل السابع)؛ قدّر موجات الجاذبية من مصادر مادية فلكية وساهم في أفكار وخطط للكشف عن تلك الموجات (الفصل العاشر)؛ طور مع آخرين النموذج الغشائي للثقوب السوداء (الفصل الحادي عشر)؛ وطور أفكاراً حول الأصل الإحصائي للإنتروبيا للثقب الأسود (الفصل الثاني عشر)؛ بحث في قوانين الفيزياء عن طريق التجارب الفكرية حول الثقوب الدودية وآلات الزمن (الفصل الرابع عشر).

والد، روبرت (ولد في 1947). عالم فيزياء نظرية أمريكي. طالب لدى ويلر. ساهم في الصيغة الرياضية لتيوكولسكي لتحليل اضطرابات الثقوب السوداء وتطبيقاتها (الفصل السابع)؛ طور مع آخرين فهماً لكيفية سلوك المجالات الكهربية خارج الثقب الأسود، وهو الفهم الذي يكمن وراء نموذج الغشاء (الفصل الحادي عشر)؛ ساهم في نظرية تبخر الثقوب السوداء وتأثيراتها على أصل إنتروبيا الثقب الأسود (الفصل الثاني عشر)؛ مع جيروش، قدم الحجة الأولى التي تشير إلى أن آلات الزمن قد تدمر كلما حاولت التشكل (الفصل الرابع عشر).

ويبر، جوزيف (ولد في 1919). عالم فيزياء تجريبية أمريكي. اخترع أول كاشف لموجات الجاذبية في العالم «كواشف القضيب» وشارك في اختراع كواشف التداخل لموجات الجاذبية (الفصل العاشر)؛ يُنظر إليه عالمياً على أنه «الأب» لمجال اكتشاف موجات الجاذبية.

ويلر، جون أرتشيبالد (ولد في 1911). عالم فيزياء نظرية أمريكي. مرشد للباحثين الأمريكيين حول الثقوب السوداء وجوانب أخرى من النسبية العامة (الفصل السابع)؛ طور مع هاريسون وواكانو معادلة حالة المادة الباردة الميتة وفهرسًا كاملاً للنجوم الباردة الميتة، مما عزز الأدلة على أنه عندما تموت النجوم الضخمة يجب أن تشكل ثقوبًا سوداء (الفصل الخامس)؛ وطوّر مع نيلز بور نظرية الانشطار النووي (الفصل السادس)؛ قاد الفريق الذي صمم القنابل الهيدروجينية الأمريكية الأولى (الفصل السادس)؛ جادل في معركة مع أوبنهايمر بأن الثقوب السوداء لا يمكن أن تتشكل، ثم تراجع عن حجته وأصبح المؤيد الرئيسي للثقوب السوداء (الفصل السادس)؛ صاغ عبارات «الثقب الأسود» (الفصل السادس) و«الثقب الأسود ليس له شعر» (الفصل السابع)؛ جادل بأن «مسألة الحالة النهائية» للنجوم المتفجرة بفعل الجاذبية هي المفتاح لفهم الزواج بين النسبية العامة والميكانيكا الكمومية، وفي هذه الحجة توقع اكتشاف هوكينج أن الثقوب السوداء يمكن أن تبخر (الفصلان السادس والثالث عشر)؛ وضع أسسًا لقوانين الجاذبية الكمومية، والأهم من ذلك، تصور وطور مفهوم الرغوة الكمومية، التي نشك الآن في أنها المادة التي تُصنع منها المفردات (الفصل الثالث عشر)؛ طور مفهوم طول ومساحة بلانك-ويلر (الفصول الثاني عشر والثالث عشر والرابع عشر).

زيلدوفيتش، ياكوف بوريسوفيتش (1914-1987). عالم فيزياء نظرية وعالم فيزياء فلكية سوفيتي؛ ومرشد لعلماء الفيزياء الفلكية السوفيت (الفصل السابع)؛ طور نظرية التفاعلات النووية المتسلسلة (الفصل الخامس)؛ اخترع الأفكار الرئيسية التي تكمن وراء القنابل الذرية والهيدروجينية السوفيتية، وقاد فريق تصميم القنبلة (الفصل السادس)؛ مع دوروشكيفيتش ونوفيكوف، طوروا دليلًا مبكرًا على أن الثقب الأسود ليس له شعر (الفصل السابع)؛ اخترع عدة طرق للبحث الفلكي عن الثقوب السوداء، ويبدو أن إحداها قد نجحت في النهاية (الفصل الثامن)؛ بشكل مستقل عن سالبيرتر، اقترح أن الثقوب السوداء فائقة الكتلة تغذي النجوم الزائفة والمجرات الراديوية (الفصل التاسع)؛ تصور فكرة أن قوانين الميكانيكا الكمومية قد تتسبب في إشعاع الثقوب السوداء الدوارة وبالتالي توقف اللف المحوري لها، وأثبت ذلك مع ستاروبينسكي، لكنه قاوم بعد ذلك برهان هوكينج القائل بأنه حتى الثقوب غير الدوارة يمكن أن تشع وتبخر (الفصل الثاني عشر).

زفيكي، فريتز (1898-1974). عالم فيزياء نظرية أمريكي سويسري المولد، وعالم فيزياء فلكية، وعالم فلك بصري؛ حدد مع بادي، المستعرات العظمى على أنها فئة من الأجرام السماوية الفلكية واقترح أنها تعمل بالطاقة المتحررة بعدما يتحول النجم العادي إلى نجم نيوتروني (الفصل الخامس).

التسلسل الزمني

1687: نشر نيوتن كتابه «المبادئ» الذي صاغ فيه مفاهيمه عن المكان والزمن المطلقين، وقوانينه عن الحركة وقوانين الجاذبية. [الفصل الأول]

1783 و 1795: صاغ ميشيل ولا بلاس - باستخدام قوانين نيوتن للحركة والجاذبية والضوء - مفهوم الثقب الأسود وفق فيزياء نيوتن. [الفصل الثالث]

1864: صاغ ماكسويل قوانينه الموحدة للكهر ومغناطيسية. [الفصل الأول]

1887: أظهر مايكلسون ومورلي، تجريبياً، أن سرعة الضوء مستقلة عن سرعة الأرض عبر المكان المطلق. [الفصل الأول]

1905: أوضح أينشتاين أن المكان والزمن نسيان وليسا مطلقين، صاغ قوانين النسبية الخاصة في الفيزياء. [الفصل الأول]

أوضح أينشتاين أن الموجات الكهر ومغناطيسية تتصرف في بعض الظروف مثل الجسيمات، وبالتالي يبدأ مفهوم ازدواجية الموجة/ الجسيم الذي يكمن وراء الميكانيكا الكمومية. [الفصل الرابع]

1907: أينشتاين، اتخذ خطواته الأولى نحو النسبية العامة، صاغ مفهوم إطار القصور الذاتي المحلي ومبدأ التكافؤ، واستنتج تمدد الزمن بفعل الجاذبية. [الفصل الثاني]

1908: وحد هيرمان مينكوفسكي المكان والزمن في زمكان مطلق رباعي الأبعاد. [الفصل الثاني]

1912: أدرك أينشتاين أن الزمكان منحني، وأن جاذبية المد والجزر هي مظهر من مظاهر هذا الانحناء. [الفصل الثاني]

1915: صاغ أينشتاين وهيلبرت بشكل مستقل معادلة المجال لأينشتاين (التي تصف كيفية التي تسبب بها الكتلة انحناءات الزمكان)، وبالتالي استكمال قوانين النسبية العامة. [الفصل الثاني]

1916: اكتشف كارل شفارتزشيلد حل شفارتزشيلد لمعادلة المجال لأينشتاين، والذي سيتبين

لاحقاً أنه يصف الثقوب السوداء غير الدوارة وغير المشحونة. [الفصل الثالث]

اكتشف فلام أنه مع الاختيار المناسب للطوبولوجيا، يمكن أن يصف حل سفارتسيلد لمعادلة المجال لأينشتاين الثقب الدودي. [الفصل الرابع عشر]

1916 و 1918: اكتشف رايسر ونوردستروم حلها لمعادلة مجال لأينشتاين، والذي سيصف لاحقاً الثقوب السوداء المشحونة غير الدوارة. [الفصل السابع]

1926: إدينجتون يطرح لغز الأقزام البيضاء ويهاجم حقيقة الثقوب السوداء. [الفصل الرابع]

أكمل شروندجر وهايزنبرج، بناءً على أعمال الآخرين، صياغة قوانين الميكانيكا الكمومية في الفيزياء. [الفصل الرابع]

استخدم فاو لر قوانين الميكانيكا الكمومية لإظهار كيف يحل انتكاس الإلكترون لغز الأقزام البيضاء. [الفصل الرابع]

1930: اكتشف تشاندراسخار أن هناك كتلة قصوى للأقزام البيضاء. [الفصل الرابع]

1932: اكتشف تشادويك النيوترون. [الفصل الخامس]

1933: اكتشف جانسكي موجات الراديو الكونية. [الفصل التاسع]

1934: أنشأ لاندau مجموعته البحثية في اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية. ثم بدأ في نقل الفيزياء النظرية إلى هناك من أوروبا الغربية. [الفصل الخامس والثالث عشر]

حدد بادى وزفيكي المستعرات العظمى، واقترح مفهوم النجم النيوتروني، واقترح أن المستعرات العظمى تستمد طاقتها من الانفجار الداخلي لقلب نجمي لتكوين نجم نيوتروني. [الفصل الخامس]

1935: يُكمل تشاندراسخار عرضه للكتلة القصوى للنجوم من فئة القزم الأبيض، ويهاجم إدينجتون عمله. [الفصل الرابع]

1935-1939: الرعب الكبير في جمهورية اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية. [الفصلان الخامس والسادس]

1957: أثبت جرينشتاين وويل أن موجات الراديو الكونية التي أطلقها جانسكي لا يمكن تفسيرها من خلال العمليات الفيزيائية الفلكية المعروفة آنذاك. [الفصل التاسع]

يقترح لاندau، في محاولة يائسة لتجنب السجن والموت، أن النجوم تظل ساخنة بسبب الطاقة المنطلقة عندما تتدفق المادة إلى القلب النيوتروني في مراكزها. [الفصل الخامس]

1958: سجن لاندau في موسكو بتهمة التجسس لصالح ألمانيا. [الفصل الخامس]

يدحض أوبنهايمر وسيبرير طريقة لاندאו عن فكرة القلب النيوتروني لإبقاء النجوم ساخنة؛ أظهر أوبنهايمر وفولكوف أن هناك كتلة قصوى للنجوم النيوترونية. [الفصل الخامس]

أظهر بيث وكريتشفيلد أن الشمس والنجوم الأخرى تظل ساخنة عن طريق حرق الوقود النووي. [الفصل الخامس]

1939: إطلاق سراح لانداو الذي كان على وشك الموت من السجن. [الفصل الخامس]

رأى أينشتاين أن الثقوب السوداء لا يمكن أن توجد في الكون الحقيقي. [الفصل الرابع]

أظهر أوبنهايمر وسنايدر، في حسابات مثالية للغاية، أن النجم المنفجر يشكل ثقبًا أسود، و(للمفارقة) يبدو أن الانفجار الداخلي يتجمد في الأفق كما يُرى من الخارج، ولكن ليس كما يُرى من سطح النجم. [الفصل السادس]

يكتشف روبرت موجات الراديو الكونية من المجرات البعيدة، لكنه لا يعرف أن هذا ما يراه حقًا. [الفصل التاسع]

طور بور وويلر نظرية الانشطار النووي. [الفصل السادس]

طور خاريتون وزيلدوفيش نظرية التفاعل المتسلسل للانشطار النووي. [الفصل السادس]

الجيش الألماني يغزو بولندا، مما أدى إلى اندلاع الحرب العالمية الثانية.

1942: تطلق الولايات المتحدة برنامجًا مكثفًا لتطوير القنبلة الذرية بقيادة أوبنهايمر. [الفصل السادس]

1943: أطلق الاتحاد السوفيتي جهدًا على مستوى منخفض لتصميم مفاعلات نووية وقنابل ذرية، وكان زيلدوفيش هو المنظر الرئيسي. [الفصل السادس]

1945: ألقت الولايات المتحدة قنبلتين ذريتين على هيروشيما وناجازاكي. انتهاء الحرب العالمية الثانية. بدأت جهود أمريكية منخفضة المستوى لتطوير القنبلة العملاقة. [الفصل السادس]

أطلق الاتحاد السوفيتي برنامجًا مكثفًا لتطوير القنبلة الذرية، وكان زيلدوفيش هو المنظر الرئيسي. [الفصل السادس]

1946: أطلق فريدمان وفريقه أول أداة فلكية فوق الغلاف الجوي للأرض، على متن صاروخ ألماني من طراز V-2. [الفصل الثامن]

بدأ علماء الفيزياء التجريبية في إنجلترا وأستراليا في بناء التلسكوبات الراديوية ومقاييس التداخل الراديوي. [الفصل التاسع]

1948: زيلدوفيش ساخاروف، وجينزبرج، وآخرون في الاتحاد السوفيتي بدأوا أعمال التصميم لقنبلة فائقة (قنبلة هيدروجينية)؛ اخترع جينزبرج وقود LiD، واخترع ساخاروف تصميم الكعكة

1949: فجر الاتحاد السوفيتي قبلته الذرية الأولى، مما أثار جدلاً في الولايات المتحدة حول برنامج مكثف لتطوير القنبلة العملاقة. واتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية ينتقل مباشرة إلى برنامج مكثف للقنبلة العملاقة، من دون نقاش. [الفصل السادس]

1950: الولايات المتحدة تطلق جهد القنبلة الخارقة. [الفصل السادس]

أدرك كينيهور وجينزبرج أن موجات الراديو الكونية تنتج عن طريق إلكترونات الأشعة الكونية المتصاعدة في المجالات المغناطيسية بين-النجوم. [الفصل التاسع]

بدأ ألكساندروف وبيمينوف محاولة مشؤومة لإدخال أدوات طوبولوجية في الدراسات الرياضية للزكان المنحني. [الفصل الثالث عشر]

1951: ابتكر تيلر وفلام في الولايات المتحدة فكرة قنبلة خارقة «حقيقية»، يمكن أن تكون قوية بشكل تعسفي؛ شكّل ويلر فريقاً لتصميم القنبلة بناءً على هذه الفكرة وقدم محاكاة انفجارها على أجهزة الحاسوب. [الفصل السادس]

زود جراهام سميث باد بصندوق خطأ مدته دقيقة قوسية واحدة لمصدر الراديو الكوني Cyg A، ويكتشف باد باستخدام تلسكوب بصري أن Cyg A هي مجرة بعيدة - «مجرة راديوية». [الفصل التاسع]

1952: أجرت الولايات المتحدة أول قنبلة خارقة لها، وهي قنبلة ضخمة جداً بحيث لا يمكن إطلاقها بواسطة طائرة أو صاروخ، ولكن باستخدام اختراع تيلر-فلام واستناداً إلى أعمال التصميم التي قام بها فريق ويلر. [الفصل السادس]

1953: بدأ ويلر في البحث في النسبية العامة. [الفصل السادس]

اكتشف جينيسون وداس جوبتا أن موجات الراديو الصادرة عن المجرات أنتجها فضاءان عملاقان على جانبي المجرة المتقابلين. [الفصل التاسع]

موت ستالين. [الفصل السادس]

فجر الاتحاد السوفيتي قبلته الهيدروجينية الأولى، بناءً على أفكار جينزبرج وساخاروف. ويزعم العلماء الأمريكيون أنها ليست قنبلة فائقة «حقيقية» لأن التصميم لا يسمح للقنبلة بأن تكون قوية بشكل تعسفي. [الفصل السادس]

1954: ابتكر ساخاروف وزيلدوفيش فكرة تيلر-أولام لقنبلة فائقة «حقيقية». [الفصل السادس]

فجرت الولايات المتحدة أول قنبلة فائقة حقيقية، بناءً على فكرة تيلر-أولام/ساخاروف-زيلدوفيش. [الفصل السادس]

شهد تيلر ضد أوبنهايمر، وألغى التصريح الأمني لأوبنهايمر. [الفصل السادس]

1955: فجر الاتحاد السوفيتي أول قنبلة فائقة حقيقية، بناءً على فكرة تيلر-أولام/ساخاروف-زيلدوفيش. [الفصل السادس]

صاغ ويلر مفهوم تقلبات فراغ الجاذبية، وحدد طول بلانك-ويلر باعتباره المقياس الذي تصبح فيه ضخمة، واقترح أنه على هذا المقياس يستبدل بمفهوم الزمكان الرغوة الكمومية. [الفصول الثاني عشر والثالث عشر والرابع عشر]

1957: صاغ ويلر وهاريسون وواكانو مفهوم المادة الباردة الميتة وعملوا كتالوجًا لجميع النجوم الباردة الميتة المحتملة. يؤكد كتالوجهم استنتاج مفاده أن النجوم الضخمة يجب أن تنفجر عندما تموت. [الفصل الخامس]

درست مجموعة ويلر الثقوب الدودية؛ ابتكر ريج وويلر أساليب التقلب لتحليل التقلبات الصغيرة في الثقوب الدودية؛ ستستخدم صيغتهما الرياضية لاحقًا لدراسة تقلبات الثقوب السوداء. [الفصلان السابع والرابع عشر]

طرح ويلر مسألة الحالة النهائية للانفجار الداخلي للنجوم باعتبارها الكأس المقدسة للبحث، وفي مواجهة مع أوبنهايمر، عارض فكرة أن الحالة النهائية ستكون مخفية داخل ثقب أسود. [الفصلان السادس والثالث عشر]

1958: اكتشف فنكلشتاين إطارًا مرجعيًا جديدًا لهندسة سفارتشيلد، وحل مفارقة أوبنهايمر-سنايدر عام 1939 حول سبب تجمد النجم المتفجر عند المحيط الحرج كما يُرى من الخارج، ولكنه ينفجر من خلال المحيط الحرج كما يُرى من الداخل. [الفصل السادس]

1958-1960: بنى ويلر تدريجيًا مفهوم الثقب الأسود وأصبح من أبرز المؤيدين له. [الفصل السادس]

1959: رأى ويلر أن مفردات الزمكان التي تتشكل في الانسحاق العظيم أو داخل الثقب الأسود تخضع لقوانين الجاذبية الكمومية، وقد تتكون من رغوة كمية. [الفصل الثالث عشر]

أوضح بوربيدج أن الفصوص العملاقة للمجرات الراديوية تحتوي على طاقة مغناطيسية وحركية تعادل تلك التي يمكن الحصول عليها عن طريق التحويل المثالي لـ 10 ملايين شمس إلى طاقة نقية. [الفصل التاسع]

1960: بدأ ويدر في إنشاء أجهزة كشف باستخدام القضبان لموجات الجاذبية. [الفصل العاشر]

كروسكال يوضح أنه إذا لم يرتبط الثقب الدودي بأي مادة، فسوف ينقطع الثقب الدودي الكروي بسرعة كبيرة بحيث لا يمكن العبور من خلاله. [الفصل الرابع عشر]

اكتشف جريفز وبريل أن حل رايسنر-نوردستروم لمعادلة أينشتاين يصف ثقبًا أسود كرويًا مشحونًا كهربيًا وثقبًا دوديًا أيضًا. [الفصل السابع] اقترح عملهما (بشكل غير صحيح) أنه قد يكون من الممكن السفر من داخل الثقب الأسود في كوننا عبر الفضاء/ المكان الفائت إلى كون آخر. [الفصل الثالث عشر]

1961: جادل خالانتنيكوف وليفشيتز (بشكل غير صحيح) بأن معادلة أينشتاين للمجال لا تسمح بوجود مفردات ذات انحناء مشوه عشوائيًا، وبالتالي لا يمكن أن تتشكل المفردات داخل الثقوب السوداء الحقيقية أو في الانسحاق العظيم للكون. [الفصل الثالث عشر]

1961-1962: يبدأ زيلدوفيش البحث في الفيزياء الفلكية والنسبية العامة، وعين نوفيكوف، وبدأ في بناء فريقه البحثي. [الفصل السادس]

1962: بدأ ثورن البحث بتوجيه من ويلر ليعمل على البحث الذي سيؤدي إلى حدسية الطوق. [الفصل السابع]

اكتشف جياكوني وفريقه الأشعة السينية الكونية، باستخدام عداد جيغر المخلق فوق الغلاف الجوي للأرض على صاروخ أوروبي. [الفصل الثامن]

1963: اكتشف كير حله لمعادلة المجال لأينشتاين. [الفصل السابع]

اكتشف شميدت وجرينشتاين وسانداج النجوم الزائفة. [الفصل التاسع]

1964: بدأ العصر الذهبي لأبحاث الثقب الأسود النظرية. [الفصل السابع]

قدم بنروز الطوبولوجيا كأداة في أبحاث النسبية، واستخدمها لإثبات أن المفردات يجب أن توجد داخل جميع الثقوب السوداء. [الفصل الثالث عشر]

اكتشف جينزبرج ومن ثم دوروشكيفيتش ونوفيكوف وزيلدوفيش أول دليل على أن الثقب الأسود ليس له «شعر». [الفصل السابع]

كيّفت شركات كولجيت، وماي، وايت في الولايات المتحدة، وبودوريتس، وإمشينيك، وناديجين في الاتحاد السوفييتي، رموز الكمبيوتر الخاصة بتصميم القنابل لمحاكاة الانهيارات الداخلية الواقعية للقلوب النجمية؛ لتؤكد فرضية زفيكي عام 1934 بأن الانفجارات الداخلية ذات الكتلة المنخفضة ستشكل نجمًا نيوترونيًا وتؤدي إلى ظهور مستعر أعظم، وتؤكد استنتاج أوبنهايمر-سنايدر عام 1939 بأن الانفجارات الداخلية ذات الكتلة الأكبر ستخلق ثقبًا أسود. [الفصل السادس]

قدم زيلدوفيش وجوسينوف وسالبيتر المقترحات الأولى لكيفية البحث عن الثقوب السوداء في الكون الحقيقي. [الفصل الثامن]

توقع سالبيتر وزيلدوفيش (بشكل صحيح) أن الثقوب السوداء الهائلة تزود النجوم الزائفة

اكتشف هيربرت فريدمان وفريقه Cygnus X-1، باستخدام عداد جيجر أطلق على متن صاروخ. [الفصل الثامن]

1965: اكتشف بوير وليندكويست وكارتر وبنروز أن حل كير لمعادلة مجال أينشتاين يصف ثقباً أسود دواراً. [الفصل السابع]

1966: اقترح زيلدوفيش ونوفيكوف البحث عن الثقوب السوداء في الثنائيات، حيث يصدر أحد الأجسام الأشعة السينية والآخر الضوء؛ ستنتج هذه الطريقة في السبعينيات (على الأرجح). [الفصل الثامن]

أوضح جيروش أن طوبولوجيا الفضاء يمكن أن تتغير (على سبيل المثال، يمكن أن يتشكل ثقب دودي) بشكل غير كمومي فقط إذا استخدمت آلة زمن في هذه العملية، على الأقل للحظات. [الفصل الرابع عشر]

1967: أطلق ويلر اسم الثقب الأسود. [الفصل السابع]

أثبت إسرائيل بدقة الجزء الأول من الثقب الأسود، وهو التخمين الذي لا يوجد به شعر: الثقب الأسود الذي لا يلف محورياً يجب أن يكون كروياً تماماً. [الفصل السابع]

1968: يرى بنروز أنه من المستحيل السفر من داخل الثقب الأسود في كوننا عبر الفضاء/ المكان الفائت إلى كون آخر؛ وسيؤكد آخرون، في السبعينيات، أن حجته صحيحة. [الفصل الثالث عشر]

اكتشف كارتر طبيعة دوامة المكان حول ثقب أسود دوار وتأثيرها على الجسيمات الساقطة. [الفصل السابع]

اكتشف ميسنر وبشكل مستقل بيلينسكي وخالاتنيكوف وليفشيتز مفردة «ميكسماستر»/ مضرب البيض المتذبذب كحل لمعادلة أينشتاين. [الفصل الثالث عشر]

1969: أثبت هوكينج وبنروز أن كوننا لا بد أن لديه مفردة في بداية توسع الانفجار الأعظم. [الفصل الثالث عشر]

اكتشف بيلينسكي وخالاتنيكوف وليفشيتز مفردة BKL المتذبذبة كحل لمعادلة أينشتاين؛ لقد أظهروا أن لديها تشوهات عشوائية في انحناء الزمكان الخاص بها، وجادلوا بأنها بالتالي نوع المفردة الذي يتشكل داخل الثقوب السوداء وفي الانسحاق العظيم. [الفصل الثالث عشر]

اكتشف بنروز أن الثقب الأسود الدوار يخزن طاقة هائلة في الحركة الدوامية للمكان حوله، ويمكن استخراج هذه الطاقة الدورانية. [الفصل السابع]

اقترح بنروز حدسيته للرقابة الكونية، وهو أن قوانين الفيزياء تمنع المفردات العارية من التشكل. [الفصل الثالث عشر]

اقترح ليندن-بيل أن الثقوب السوداء العملاقة توجد في قلوب المجرات وتحيط بها أقراص متراكمة. [الفصل التاسع]

لاحظ كريستودولو وجود تشابه بين تطور الثقب الأسود عندما يراكم المادة ببطء وقوانين الديناميكا الحرارية. [الفصل الثاني عشر]

أعلن ويبر عن أدلة رصدية مبدئية لوجود موجات الجاذبية، مما دفع العديد من التجريبيين الآخرين إلى البدء في بناء أجهزة الكشف عن القضبان. بحلول عام 1975 سيكون من الواضح أنه لم يرَ أي موجات. [الفصل العاشر]

اكتشف براجينسكي دليلاً على أنه هناك حد كمومي لحساسيات كواشف موجات الجاذبية. [الفصل العاشر]

1970: أوضح ياردين أن تراكم الغاز من المرجح أن يجعل الثقوب السوداء النموذجية في كوننا تدور بسرعة كبيرة. [الفصل التاسع]

أوضح بريس، بناءً على أعمال بنروز، ونوفيكوف، وتشاس، ودي لا كروز، وإسرائيل، أن الثقوب السوداء تفقد شعرها عن طريق بثق إشعاعها بعيداً، وأثبت أن أي شيء يشع سوف يبتلع بعيداً تماماً. [الفصل السابع]

صاغ هوكينج مفهوم الأفق المطلق للثقب الأسود وأثبت أن المساحات السطحية للأفق المطلق تتزايد دائماً. [الفصل الثاني عشر]

بنى فريق جياكوني أوهورو، أول كاشف للأشعة السينية على قمر صناعي؛ يطلق في المدار. [الفصل الثامن]

1971: بدأت عمليات الرصد المجمع للأشعة السينية والموجات الراديوية والبصرية في تقديم أدلة قوية على أن الدجاجة س-1 عبارة عن ثقب أسود يدور حول نجم عادي. [الفصل الثامن]

فايس من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا وفوروارد من هيوز رائدان في أجهزة الكشف عن التداخل لموجات الجاذبية. [الفصل العاشر]

اقترح فايس أن الفصوص العملاقة للمجرة الراديوية مدعومة بتدفقات النفاثات التي تنطلق من قلب المجرة. [الفصل التاسع]

صاغ هاني وروفييني مفهوم الشحنة السطحية على الأفق، وهو الأساس لنموذج الغشاء. [الفصل الحادي عشر]

اكتشف بريس أن الثقوب السوداء يمكن أن تنبض. [الفصل السابع]

تكهن زيلدوفيش بأن الثقوب السوداء الدوارة تشع، واستخدم زيلدوفيش وستاروينسكي قوانين الحقول الكمومية في الزمكان المنحني لتبرير تكهنات زيلدوفيش. [الفصل الثاني عشر]

المرح هوكينج إلى أن الثقوب السوداء «البدائية» الصغيرة ربما تكونت في أثناء الانفجار الأعظم. [الفصل الثاني عشر]

1972: أثبت كارتر، بناءً على عمل هوكينج وإسرائيل، فرضية عدم وجود شعر للثقوب السوداء الدوارة غير المشحونة (باستثناء بعض التفاصيل العلمية التي ملأها روبنسون لاحقاً). ويظهر أن مثل هذا الثقب الأسود يصفه دائماً حل كير لمعادلة أينشتاين. [الفصل السابع]

اقترح ثورن حدسية الطوق كمعيار لتشكل الثقوب السوداء. [الفصل السابع]

خمن بيكنشتاين أن مساحة سطح الثقب الأسود هي إنتروبيا مقنعة، وخمن أن إنتروبيا الثقب هي لوغاريتم عدد الطرق التي يمكن أن يتكون بها الثقب. جادل هوكينج بقوة ضد هذا التخمين. [الفصل الثاني عشر]

صاغ بارددين وكارتر وهوكينج قوانين تطور الثقوب السوداء في شكل مطابق لقوانين الديناميكا الحرارية، لكنهم أكدوا أن مساحة سطح الأفق لا يمكن أن تكون إنتروبيا الثقب المقنعة. [الفصل الثاني عشر]

طور تيوكولسكي أساليب التقلبات لوصف نبضات الثقوب السوداء الدوارة. [الفصل السابع]

1973: أثبت بريس وتيوكولسكي أن نبضات الثقب الأسود الذي يلف محوريًا مستقرة؛ فهي لا تنمو عن طريق تغذية الطاقة الدورانية للثقب. [الفصل السابع]

1974: أوضح هوكينج أن جميع الثقوب السوداء، سواء كانت تلف محوريًا أو لا تدور، تشع بدقة كما لو أن درجة حرارتها تتناسب مع جاذبية سطحها، وبالتالي تبخر. ثم تراجع عن ادعائه بأن قوانين ميكانيكا الثقب الأسود ليست قوانين الديناميكا الحرارية المقنعة، وتراجع عن انتقاده لحدسية بيكنشتاين بأن مساحة سطح الثقب هي إنتروبيا مقنعة. [الفصل الثاني عشر]

1974-1978: حدد بلاندفورد وريس وليندن-بيل عدة طرق يمكن من خلالها للثقوب السوداء الهائلة الموجودة في نوى المجرات والنجوم الزائفة إنشاء نفاثات. [الفصل التاسع]

1975: أوضح بارددين وبيترسون أن دوامة الفضاء/ المكان حول ثقب أسود دوار يمكن أن تكون بمثابة جيروسكوب للحفاظ على اتجاهات تدفقات النفاثات. [الفصل التاسع]

شرع تشاندراسخار في مسعى مدته خمس سنوات لتطوير وصف رياضي كامل لتقلبات

استنتج أونروه وديفيز أنه كما يراه الراصدون المتسارعون فوق أفق الثقب الأسود مباشرة، فإن الثقب محاط بغلاف جوي حار من الجسيمات، والذي يفسر هروبها التدريجي تبخر الثقب. [الفصل الثاني عشر]

حسب بايج طيف الجسيمات التي تشعها الثقوب السوداء. استنتج هوكينج وبايج، من بيانات الرصد لأشعة جاما الكونية، عدم إمكانية وجود أكثر من 300 ثقب أسود صغير بدائي متبخر في كل سنة ضوئية مكعبة من الفضاء. [الفصل الثاني عشر]

الإعلان عن انتهاء العصر الذهبي لأبحاث الثقوب السوداء النظرية من قِبل الباحثين الشباب. [الفصل السابع]

1977: تحقق جيبونز وهوكينج من تخمين بيكنشتاين بأن إنتروبيا الثقب الأسود هي لوغاريتم عدد الطرق التي قد يكون نشأ بها. [الفصل الثاني عشر]

استخدم علماء الفلك الراديوي مقاييس التداخل لاكتشاف تدفقات النفاثات التي تغذي الطاقة من محرك الثقب الأسود المركزي للمجرة إلى فصوصها العملاقة التي ينبعث منها الراديو. [الفصل التاسع]

أظهر بلاندفورد وزناجيك أن المجالات المغناطيسية، التي ترسم أفق ثقب أسود يلف محوريًا، يمكنها استخلاص طاقة اللف الخاصة بالثقب، وأن الطاقة المستخرجة يمكنها تشغيل النجوم الزائفة والمجرات الراديوية. [الفصل التاسع]

صاغ زناجيك ودامور الوصف الغشائي لأفق الثقب الأسود. [الفصل الحادي عشر]

ابتكر براجينسكي وزملاؤه، وكيفز وثورن وزملاؤهما «أجهزة استشعار كمومية لاهدمية» للتحايل على الحد الكمومي في أجهزة الكشف القضيية لموجات الجاذبية. [الفصل العاشر]

1978: انتهت مجموعة جياكوني من بناء أول تلسكوب للأشعة السينية عالي الدقة، سمي «أينشتاين»، وأطلق في مداره. [الفصل الثامن]

1979: اكتشف تاووز وآخرون دليلًا على وجود ثقب أسود كتلته 3 ملايين كتلة شمسية في مركز مجرتنا. [الفصل التاسع]

بدأ ديرفر مشروعًا للكشف عن موجات الجاذبية التداخلية في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا. [الفصل العاشر]

1982: أثبت بونتيج ومازور تخمين عدم وجود شعر للثقوب السوداء التي تلف محوريًا، المشحونة كهربيًا. [الفصل السابع]

- 1983-1988: طور فيني وآخرون نماذج شاملة تعتمد على الثقوب السوداء لشرح التفاصيل الكاملة للنجوم الزائفة والمجرات الراديوية. [الفصل التاسع]
- 1984: صاغت مؤسسة العلوم الوطنية زواجًا قويًا بين جهود معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا ومعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا للكشف عن موجات الجاذبية، مما أدى إلى ظهور مشروع LIGO [الفصل العاشر]
- يُظهر ريدماونت (بناءً على عمل سابق لإياردلي) أن الإشعاع الذي يسقط في ثقب دودي كروي فارغ يتسارع إلى طاقة عالية ويسرع بشكل كبير من ضغط الثقب الدودي (انهياره). [الفصل الرابع عشر]
- 1993-1995: بحث ثورن وموريس ويورتسيفير وفريدمان ونوفيكوف وآخرون في قوانين الفيزياء من خلال التساؤل عما إذا كانت تسمح بوجود ثقوب دودية وآلات زمنية يمكن عبورها. [الفصل الرابع عشر]
- 1987: أصبح فوجت مديرًا للمشروع LIGO، ثم بدأ في الماضي قدمًا بقوة. [الفصل العاشر]
- 1990: أوضح كيم وثورن أنه عندما يحاول المرء إنشاء آلة زمنية، بأي طريقة كانت، فإن شعاعًا مكثفًا من تقلبات الفراغ يدور عبر الآلة في لحظة إنشائها لأول مرة. [الفصل الرابع عشر]
- 1991: اقترح هوكينج حدسية حماية التسلسل الزمني (أن قوانين الفيزياء تحظر آلات الزمن) وجادل بأن ما سيفرضه هو الشعاع المنتشر لتقلبات الفراغ الذي يدمر أي آلة زمنية في لحظة تكوينها. [الفصل الرابع عشر]
- يُظهر إسرائيل وبواسون وأوري، بناءً على عمل دوروشكيفيتش ونوفيكوف، أن المفردة داخل الثقب الأسود تتفاد؛ أوضح أوري أنه عندما يكون الثقب عجوزًا وهادئًا، فإن الأجسام الساقطة لا تتشوه بشدة بسبب المد والجزر بفعل الجاذبية للمفردة حتى لحظة اصطدامها بقلبها الخاضع للجاذبية الكمومية. [الفصل الثالث عشر]
- اكتشف شابيرو وتيوكولسكي أدلة، في عمليات المحاكاة الحاسوبية العملاقة، أن حدسية الرقابة الكونية قد تكون خاطئة: قد تشكل المفردات العارية عندما تنفجر النجوم غير الكروية إلى حد كبير. [الفصل الثالث عشر]
- 1993: مُنح هولس وتايلور جائزة نوبل لإثباتهما، من خلال قياسات النجم النابض الثنائي، وجود موجات الجاذبية. [الفصل العاشر]

قاموس المصطلحات العلمية

تعريفات المصطلحات الغريبة

المصطلح باللغة العربية	المصطلح باللغة الإنجليزية	التعريف والمعنى العربي
المطلق	absolute	المستقل عن الإطار المرجعي للمرء؛ الذي له نفس القياس في كل إطار مرجعي.
الأفق المطلق	absolute horizon	سطح الثقب الأسود. انظر الأفق.
المكان المطلق	absolute space	تصور نيوتن للمكان ثلاثي الأبعاد الذي نعيش فيه على أنه يتميز بفكرة السكون المطلق، وباعتباره يمتلك خاصية أن أطوال الأشياء مستقلة عن حركة الإطار المرجعي الذي تقاس فيه.
الزمن المطلق	absolute time	مفهوم نيوتن للزمن باعتباره معممًا/ كونيًا، مع فكرة فريدة ومتفق عليها كونيًا/ معممًا لتزامن الأحداث وهي أن الفاصل الزمني فريد ومتفق عليه كونيًا/ معممًا بين أي حدثين.
الراصد المتسارع (الراصد الذي يتحرك تحت تأثير عجلة)	accelerated observer	الراصد الذي لا يسقط سقوطاً حراً.
القرص التراكمي	accretion disk	قرص من الغاز يحيط بثقب أسود أو نجم نيوتروني. يؤدي الاحتكاك في القرص إلى جعل الغاز يلف محوريًا تدريجيًا نحو الداخل ويتراكم على الثقب أو النجم.
مؤشر اللاتباديلية أو الأديباتيكية	adiabatic index	هي نفس معنى مقاومة الضغط.
الأثير	aether	هو الوسط الافتراضي الذي (وفقًا لتفكير القرن التاسع عشر) يتذبذب عندما تمر عبره الموجات الكهرومغناطيسية، وبتذبذباته تصبح الموجات/ التموج ممكنًا. كان يعتقد أن الأثير في حالة سكون في الفضاء/ المكان المطلق.
عزم الدوران لكمية الحركة أو كمية الحركة الزاوية	angular momentum	مقياس لمقدار الدوران الذي يمتلكه الجسم. غالبًا ما تُستخدم كلمة اللف المحوري في هذا الكتاب بدلًا من «كمية الحركة الزاوية».
المادة المضادة	antimatter	شكل من أشكال المادة بمثابة «لعة» للمادة العادية. لكل نوع من جسيمات المادة العادية (على سبيل المثال، الإلكترون أو البروتون أو النيوترون) هناك جسيم مضاد متطابق تقريبًا من المادة المضادة (البوزيترون أو البروتون المضاد أو النيوترون المضاد). عندما يلتقي جسيم من المادة بالجسيم المضاد المقابل له من المادة المضادة، فإن أحدهما يفنى الآخر.

الأفق الظاهري	apparent horizon	الموقع الخارجي حول الثقب الأسود، وفيه تنجذب الفوتونات التي تحاول الإفلات إلى الداخل بفعل الجاذبية. وهو نفس الأفق (المطلق) فقط عندما يكون الثقب في حالة ساكنة غير متغيرة.
عالم الفلك	astronomer	عالم متخصص في رصد الأجسام الكونية باستخدام التلسكوبات.
عالم فيزياء فلكية	astrophysicist	فيزيائي (عادةً فيزيائي نظري) متخصص في استخدام قوانين الفيزياء لمحاولة فهم كيفية تصرف الأجرام السماوية الكونية.
علم الفيزياء الفلكية	astrophysics	فرع الفيزياء الذي يتعامل مع الأجرام السماوية الكونية وقوانين الفيزياء التي تحكمها.
الذرة	atom	اللبنة الأساسية للمادة. تتكون كل ذرة من نواة ذات شحنة كهربائية موجبة وسحابة محيطة بها من الإلكترونات ذات الشحنة السالبة. تربط القوى الكهربائية السحابة الإلكترونية بالنواة.
القبلة الذرية	atomic bomb	قنبلة تكتسب طاقتها الانفجارية من تفاعل متسلسل لانشطار نواة اليورانيوم 235 أو البلوتونيوم 239.
نطاق	band	مدى مجموعة من الترددات.
عرض نطاق (المقصود ترددي)	bandwidth	نطاق الترددات الذي يمكن من خلاله لجهاز قياس لرصد الموجات أن يكتشف الموجة.
مستشعر القضيب	bar detector	جهاز كشف لموجات الجاذبية، حيث تضغط الموجات قضيباً معدنياً كبيراً وتمدده، ويراقب جهاز استشعار اهتزازات القضيب.
مقسم الأشعة	beam splitter	جهاز يستخدم لتقسيم شعاع الضوء إلى قسمين يسيران في اتجاهات مختلفة، وكذلك الجمع بين شعاعين ضوئيين يأتيان من اتجاهات مختلفة.
الانفجار الأعظم	big bang	الانفجار الذي بدأ به الكون.
الانسحاق العظيم	big crunch	المرحلة الأخيرة من عودة الكون إلى الانهيار (على افتراض أن الكون سينهار في نهاية المطاف؛ فنحن لا نعرف ما إذا كان سوف ينهار أم لا).
نظام ثنائي	binary system	جسمان يدور أحدهما حول الآخر؛ قد تكون الأجسام نجومًا أو ثقوبًا سوداء أو نجمًا وثقوبًا سوداء.
مفردة (بيلينسكي - خالانتيكوف - ليفشيتز)	BKL BKL singularity	مفردة تتأرجح بالقرب من المد والجزر بفعل الجاذبية بشكل فوضوي في الزمن والمكان. هذا هو نوع المفردة الذي يتشكل على الأرجح في مراكز الثقوب السوداء وفي الانسحاق العظيم لكوننا.

الثقب الأسود	black hole	جسم/ شيء/ جرم سماوي (نشأ بسبب انفجار نجم) يمكن أن تسقط الأشياء فيه ولكن لا يمكن لأي شيء الهروب منه على الإطلاق.
نظام ثنائية الثقب الأسود	black-hole binary	نظام ثنائي يتكون من ثقبين أسودين.
عملية بلانديفورد-زناجيك	Blandford-Znajek process	استخلاص الطاقة الدورانية من ثقب أسود يلف محوريًا عن طريق المجالات المغناطيسية التي تمر عبر الثقب.
القبلة النووية المعززة	boosted atomic bomb	قبلة ذرية تزداد قوتها الانفجارية ببطقة واحدة أو أكثر من الوقود الاندماجي.
التفاعل المتسلسل	chain reaction	سلسلة من انشطارات الأنوية الذرية، تؤدي فيها النيوترونات الناتجة من انشطار واحد إلى انشطارات إضافية، والنيوترونات من تلك الانشطارات تؤدي إلى انشطارات جديدة أكثر، وهلم جرا.
حد تشاندراسخار	Chandrasekhar limit	أقصى كتلة يمكن أن يمتلكها نجم من فئة القزم الأبيض.
حدسية حماية التسلسل الزمني	chronology protection conjecture	حدسية هوكينج بأن قوانين الفيزياء لا تسمح بآلات الزمن.
الكلاسيكية (الفيزياء)	classical	تخضع لقوانين الفيزياء التي تحكم الأجسام العيانية؛ الفيزياء التي لا تنتمي إلى الميكانيكا الكمومية.
المادة الميتة، الباردة	cold, dead matter	المادة الباردة التي تنتهي فيها جميع التفاعلات النووية، وتطرد من المادة كل الطاقة النووية التي يمكن إزالتها.
النجم المنهار (المضغوط)	collapsed star	الاسم الذي أطلق على الثقب الأسود في الغرب في الستينيات.
قانون الحفظ	conservation law	أي قانون في الفيزياء ينص على أن كمية محددة لا يمكن أن تتغير أبدًا. ومن الأمثلة على ذلك الحفاظ على الكتلة والطاقة (معًا ككيان واحد عن طريق معادلة $E = Mc^2$ لأينشتاين)، والحفاظ على الشحنة الكهربائية الإجمالية، والحفاظ على كمية الحركة الزاوية (إجمالي مقدار اللف المحوري).
كريات	corpuscle	الاسم المستخدم لجزيء الضوء في القرنين السابع عشر والثامن عشر.
حدسية الرقابة الكونية	cosmic censorship conjecture	التخمين بأن قوانين الفيزياء تمنع المفردات العارية من التشكل عندما ينفجر جسم ما.
الأشعة الكونية	cosmic ray	جسيم من المادة أو المادة المضادة يقصف الأرض من الفضاء. تنتج الشمس بعض الأشعة الكونية، لكن معظمها ينشأ في مناطق بعيدة من مجرتنا درب التبانة، ربما في سحب غازية ساخنة تقذف إلى الفضاء بين-النجوم بواسطة المستعرات العظمى.

الأوتار الكونية	cosmic string	جسيم/ كائن افتراضي أحادي البعد يشبه الوتر، مصنوع من اعوجاج الفضاء/ المكان. الوتر ليست له نهايات (إما أنه مغلق على نفسه مثل الشريط المطاطي أو أنه يمتد إلى الأبد)، ويتسبب التفاف الفضاء/ المكان الخاص به في أن يكون محيط أي دائرة حوله مقسومًا على القطر أقل بقليل من π .
المحيط الحرج	critical circumference	محيط أفق الثقب الأسود؛ المحيط الذي يجب أن يقلص الجسم داخله حتى يشكّل ثقبًا أسود حول نفسه. وتبلغ قيمة المحيط الحرج 18.5 كيلومتر مضروبًا في كتلة الثقب أو الجسم بوحدات كتلة الشمس.
انحناء المكان (الفضاء) أو الزمكان	curvature of space or spacetime	خاصية تميز المكان أو الزمكان بحيث تجعله ينتهك مفاهيم إقليدس أو مينكوفسكي للهندسة؛ أي الخاصية التي تمكن الخطوط المستقيمة المتوازية في البداية من التقاطع.
الدجاجة أ	Cyg A	الدجاجة أ مجرة راديوية تشبه (لكنها ليست كذلك) مجرتين متصادمتين. أول مجرة راديوية حددت بدقة.
الدجاجة س - 1	Cyg X-1	جسم/ جرم سماوي ضخم في مجرتنا ربما يكون ثقبًا أسود. يتسبب الغاز الساخن الذي يسقط باتجاه هذا الجسم/ الجرم السماوي في الأشعة السينية التي نرصدها على الأرض.
النجمة المظلمة	dark star	عبارة استخدمت في أواخر القرن الثامن عشر وأوائل القرن التاسع عشر لوصف ما نسميه الآن بالثقب الأسود.
ضغط الانتكاس	degeneracy pressure	الضغط داخل المادة عالية الكثافة، الناتج عن حركات غير منتظمة وعالية السرعة للإلكترونات أو النيوترونات ناجمة عن ازدواجية الموجة/ الجسيم. ويظل هذا النوع من الضغط قويًا عندما تبرد المادة إلى درجة حرارة الصفر المطلق.
نواة الديوتيريوم أو الديوترونات	deuterium nuclei, or deuterons	تتكون الأنوية الذرية لها من بروتون واحد ونيوترون واحد متماسكين معًا بواسطة القوة النووية. ويسمى أيضًا «الهيدروجين الثقيل» لأن ذرات الديوتيريوم لها نفس الخصائص الكيميائية تقريبًا مثل الهيدروجين.
المعادلات التفاضلية	differential equation	معادلة تجمع في صيغة واحدة دوال مختلفة ومعدلات تغيرها؛ أي الدوال و«مشتقاتها». يُقصد بعبارة «حل معادلة تفاضلية» «حسابات الدوال نفسها من المعادلة التفاضلية».
انزياح دوبلر	Doppler shift	انزياح أو انتقال الموجة إلى تردد أعلى (طول موجي أقصر، طاقة أعلى) عندما يتحرك مصدرها (الباعث) نحو المستقبل، وإلى تردد أقل (طول موجة أطول، طاقة أقل) عندما يتحرك المصدر (الباعث) بعيدًا عن المستقبل.
الشحنة الكهربائية	electric charge	خاصية للجسم أو المادة والتي (من خلالها) ينتج القوى الكهربائية ويشعر بها.

المجال الكهربى	electric field	مجال القوى المحيط بشحنة كهربية، والذي يسحب ويدفع الشحنات الكهربائية الأخرى.
خطوط المجال الكهربى	electric field lines	الخطوط التي تشير إلى اتجاه القوى التي يؤثر بها المجال الكهربائي على الجسيمات المشحونة. المكافئ، أو المقاربة الكهربية لخطوط المجال المغناطيسى.
موجات كهرومغناطيسية	electromagnetic waves	موجات القوى الكهربية والمغناطيسية. وتشمل هذه، اعتماداً على الطول الموجي، موجات الراديو، وأجهزة الميكروويف، والأشعة تحت الحمراء، والضوء، والأشعة فوق البنفسجية، والأشعة السينية، وأشعة جاما.
إلكترون	electron	جسيم أساسي من المادة، ذو شحنة كهربية سالبة، يسكن المناطق الخارجية للذرات.
انتكاس الإلكترون	electron degeneracy	سلوك الإلكترونات عند الكثافات العالية، حيث تتحرك بطريقة عشوائية وبسرعات عالية نتيجة ازدواجية الموجة/الجسيم فى الميكانيكا الكمومية.
جسيم أولي	elementary particle	جسيم دون ذري من المادة أو المادة المضادة. ومن بين الجسيمات الأولية الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات والبوزيترونات والبروتونات المضادة والنيوترونات المضادة.
مخطط التضمين	embedding diagram	شكل توضيحي يصور فيه انحناء سطح ثنائي الأبعاد من خلال تضمينه فى مكان مسطح ثلاثى الأبعاد.
الإنتروپيا أو القصور الحرارى	entropy	مقياس لمقدار العشوائية فى مجموعات كبيرة من الذرات والجزيئات والجسيمات الأخرى؛ يساوي لوغاريتم عدد الطرق التي يمكن بها توزيع الجسيمات من دون تغيير مظهرها العياني.
معادلة الحالة	equation of state	الطريقة التي يعتمد بها ضغط المادة (أو مقاومة المادة للضغط) على كثافتها.
مبدأ التكافؤ	equivalence principle	انظر مبدأ التكافؤ.
مربع الخطأ	error box	منطقة السماء التي تشير فيها الملاحظات الرصدية إلى وجود نجم معين أو جرم سماوي آخر. يطلق عليه اسم مربع الخطأ لأنه كلما زادت حالات عدم اليقين (الأخطاء) فى الرصد، كانت هذه المنطقة أكبر.
سرعة الهروب/ الانفلات	escape velocity	السرعة التي يجب بها إطلاق الجسم من سطح جرم ما ذي جاذبية حتى يتمكن من الهروب من جاذبية الجرم ذي الجاذبية.
الحدث	event	نقطة فى الزمكان؛ أي موقع فى الفضاء فى لحظة زمنية محددة. وبدلاً من ذلك، شيء يحدث فى نقطة ما فى الزمكان، على سبيل المثال، انفجار مفرقات نارية.

المادة الغريبة	exotic material	مادة لها متوسط كثافة طاقة سالبة، بالشكل الذي يقيسه شخص يتحرك عبرها بسرعة تقارب سرعة الضوء.
المجال	field	شيء يوزع بشكل مستمر وسلس في الفضاء/ المكان. ومن الأمثلة على ذلك المجال الكهربى، والمجال المغناطيسى، وانحناء الزمكان، وموجة الجاذبية.
الانشطار، النووي	fission, nuclear	تفكك نواة ذرية كبيرة لتكوين عدة أنوية أصغر. انشطار نواة اليورانيوم أو البلوتونيوم هو مصدر الطاقة التي تؤدي إلى انفجار القنبلة الذرية، والانشطار هو مصدر الطاقة في المفاعلات النووية.
السقوط الحر للأجسام	freely falling object	جسم لا تؤثر عليه أي قوى سوى الجاذبية.
الجسيم الحر	free particle	جسيم لا تؤثر عليه أي قوى؛ أي جسم يتحرك فقط تحت تأثير قصوره الذاتى. وفي وجود الجاذبية: هو الجسيم الذي لا تؤثر عليه أي قوى سوى الجاذبية.
التردد	frequency	المعدل الذي تتذبذب به الموجة؛ أي عدد دورات التذبذب في الثانية.
النجم المتجمد	frozen star	الاسم المستخدم للثقب الأسود في الاتحاد السوفيتي خلال الستينيات.
الدالة	function	تعبير رياضي يوضح كيف تعتمد كمية واحدة، على سبيل المثال، محيط أفق الثقب الأسود، على كمية أخرى، على سبيل المثال، كتلة الثقب الأسود؛ في هذا المثال، الدالة هي $C = 4\pi GM/c^2$ ، حيث C هو المحيط، و M هي الكتلة، و G هو ثابت جاذبية نيوتن، و c هي سرعة الضوء.
الاندماج، النووي	fusion, nuclear	اندماج نواتين ذريتين صغيرتين لتكوين نواتين أكبر. تظل الشمس ساخنة وتعمل القنابل الهيدروجينية عن طريق اندماج أنوية الهيدروجين والديوتيريوم والتريتيوم لتكوين أنوية الهيليوم.
المجرة	galaxy	مجموعة تتراوح ما بين مليار إلى تريليون نجم تدور جميعها حول مركز مشترك. يبلغ قطر المجرات عادة نحو 100.000 سنة ضوئية.
أشعة جاما	gamma rays	موجات كهرومغناطيسية ذات أطوال موجية قصيرة للغاية؛ انظر الشكل ص 2 في الصفحة...
عداد جيجر	Geiger counter	أداة بسيطة للكشف عن الأشعة السينية. ويسمى أيضًا «العداد التناسبي».
النسبية العامة	general relativity	قوانين أينشتاين الفيزيائية التي تصف الجاذبية بانحناء الزمكان.
جيوديسية	geodesic	خط مستقيم في فضاء منحني أو زمكان منحني. على سطح الأرض الجيوديسي هو الدوائر الكبرى.

ثقب أسود عملاق	gigantic black hole	ثقب أسود وزن مليون شمس أو أكثر. ويُعتقد أن مثل هذه الثقوب تسكن قلب المجرات والنجوم الزائفة.
الأساليب العالمية (الشاملة)	global methods	تقنيات رياضية، تعتمد على مزيج من الطوبولوجيا والهندسة، لتحليل بنية الزمكان.
انقطاع الجاذبية (الانقطاع بفعل الجاذبية)	gravitational cutoff	عبارة أوبنهايمر عن تكوين ثقب أسود حول نجم متفجر.
عدسات الجاذبية	gravitational lens	دور جسم جاذب، مثل الثقب الأسود أو المجرة، في تركيز الضوء من مصدر بعيد عن طريق تسببه في انحراف أشعة الضوء؛ رؤية انحراف الضوء.
الانزياح الأحمر للضوء بفعل الجاذبية	gravitational redshift of light	إطالة الطول الموجي للضوء (احمرار لونه) في أثناء انتشاره للأعلى عبر مجال الجاذبية.
تمدد الزمن تحت تأثير الجاذبية	gravitational time dilation	تباطؤ تدفق الزمن بالقرب من جسم جاذب.
موجات الجاذبية	gravitational wave	تموج من انحناء الزمكان الذي ينتقل بسرعة الضوء.
الجيرافيتون	graviton	الجسيم الذي، وفقًا لازدواجية الموجة/الجسيم، يرتبط بموجات الجاذبية.
جيروسكوب	gyroscope	جسم يدور بسرعة ويحافظ على محور دورانه ثابتًا لفترة طويلة جدًا.
شعر	«hair»	أي خاصية يمكن أن يشعها الثقب الأسود بعيدًا، وبالتالي لا يمكنه التمسك بها؛ على سبيل المثال، مجال مغناطيسي أو جبل في أفقه.
حدسية الطوق	hoop conjecture	التخمين بأن الثقب الأسود يتشكل فقط عندما ينضغط جسم صغير جدًا بحيث يمكن وضع طوق بمحيط حرج حوله ولفه في كل الاتجاهات.
الأفق	horizon	سطح الثقب الأسود؛ نقطة اللا عودة، التي لا يمكن أن يخرج منها شيء. ويسمى أيضًا بالأفق المطلق لتمييزه عن الأفق الظاهر.
القنبلة الهيدروجينية	hydrogen bomb	القنبلة التي تكتسب طاقتها الانفجارية من اندماج أنوية الهيدروجين والديوتيريوم والتريتيوم لتكوين أنوية الهيليوم. انظر أيضًا القنبلة الفاتكة.
المكان/ الفضاء الفائق	hyperspace	مكان/ فضاء مسطح وهمي يتخيل فيه المرء أنه مدمج في أجزاء من المكان/ الفضاء المنحني لكوننا.
الانفجار الداخلي	implosion	الانكماش عالي السرعة للنجم بسبب سحب جاذبيته.
القصور الذاتي	inertia	مقاومة الجسم للتسارع بفعل القوى المؤثرة عليه.

إطار مرجعي قصوري (إطار مرجعي يتحرك تحت تأثير قصوره الذاتي)	inertial reference frame	إطار مرجعي لا يدور ولا تدفعه أو تسحبه قوى خارجية. إن حركة مثل هذا الإطار المرجعي مدفوعة فقط بقصوره الذاتي الخاص. انظر أيضًا الإطار المرجعي القصوري المحلي.
الأشعة تحت الحمراء	infrared radiation	الموجات الكهرومغناطيسية ذات الطول الموجي الأطول قليلًا من الضوء؛ انظر الشكل ص2 في الصفحة...
التداخل	interference	الطريقة التي تتراكب بها موجتان على بعضهما وتجمعان رياضياً خطياً، وتميز كل منهما الأخرى عندما تتطابق قممها مع القمم وقيعانها مع القيعان (تداخل بناءً)، وتلغي إحداها الأخرى عندما تتطابق القمم مع القيعان (تداخل هدام).
جهاز قياس التداخل	interferometer	جهاز يعتمد على تداخل الموجات. انظر مقياس التداخل الراديوي وكاشف قياس التداخل.
كاشف (مستشعر) الخاص بجهاز قياس التداخل	interferometric detector	كاشف لموجات الجاذبية، حيث تعمل قوى المد والجزر على اهتزاز الكتل المتدلية من الأسلاك، ويستخدم تداخل أشعة الليزر لمراقبة حركات الكتل. ويسمى أيضًا مقياس التداخل.
قياس التداخل	interferometry	عملية تداخل موجتين أو أكثر مع بعضها.
الفضاء بين-المجري (بين المجرات)	intergalactic space	الفضاء/ المكان بين المجرات.
الفضاء بين-النجمي (بين النجوم)	interstellar space	الفضاء/ المكان بين نجوم مجرتنا درب التبانة.
قانون التربيع العكسي للجاذبية	inverse square law of gravity	قانون نيوتن للجاذبية، والذي ينص على أنه بين كل زوج من الأجسام في الكون توجد قوة جاذبية تجذب الأجسام نحو بعضها، وتتناسب القوة طرديًا مع حاصل ضرب كتلتي الأجسام وعكسيًا مع مربع المسافة بينهما.
الأيون	ion	الذرة التي فقدت بعضًا من إلكتروناتها المدارية، وبالتالي لها شحنة موجبة صافية.
الغاز المتأين	ionized gas	غاز فقدت فيه نسبة كبيرة من ذراته إلكتروناتها المدارية.
تدفق النفث (النفثات)	jet	عمود من الغاز يحمل الطاقة من المحرك المركزي لمجرة راديوية أو نجم زائف إلى فضاء بعيد تنبعث منه موجات الراديو.
قوانين الفيزياء	laws of physics	المبادئ الأساسية التي يمكن من خلالها أن نستنتج، من خلال الحسابات المنطقية والرياضية، كيف يتصرف الكون.
انكماش الطول	length contraction	انكماش طول الجسم نتيجة حركته أمام الشخص الذي يقيس الطول. يحدث الانكماش فقط على طول اتجاه الحركة.
الضوء	light	نوع الموجات الكهرومغناطيسية التي يمكن رؤيتها بالعين البشرية؛ انظر الشكل ص2 في الصفحة...

الانحراف الضوئي	light deflection	انحراف اتجاه انتشار الضوء والموجات الكهرومغناطيسية الأخرى عند مرورها بالقرب من الشمس أو أي جرم آخر له جاذبية. وينتج هذا الانحراف عن انحناء الزمكان حول الجسم.
مرصد تداخل الليزر لموجات الجاذبية (LIGO)	LIGO	مرصد التداخل الليزري لموجات الجاذبية.
خطي	linear	خاصية الجمع الجبري أو الرياضي البسيط.
(فص)	lobe	سحابة ضخمة من الغاز تبعث أو تشع موجات الراديو خارج مجرة أو نجم زائف.
الإطار المرجعي القصوري المحلي	local inertial reference frame	إطار مرجعي لا تؤثر عليه أي قوى باستثناء الجاذبية، ويسقط سقوطاً حراً استجابة لسحب الجاذبية، وهو صغير بما يكفي لجعل تسارع المد والجزر بفعل الجاذبية ضئيلاً داخله.
المجال المغناطيسي	magnetic field	المجال الذي ينتج القوى المغناطيسية.
خطوط المجال المغناطيسي	magnetic field lines	الخطوط التي تشير على طول اتجاه المجال المغناطيسي (أي على طول الاتجاه الذي ستشير إليه إبرة البوصلة إذا وضعت في المجال المغناطيسي). يمكن جعل خطوط المجال هذه واضحة حول قضيب المغناطيس عن طريق وضع ورقة فوق المغناطيس ونثر برادة الحديد على الورقة.
الكتلة	mass	مقياس لكمية المادة في جسم ما. (يتناسب القصور الذاتي للجسم مع كتلته، وقد أظهر أينشتاين أن الكتلة هي في الواقع شكل مضغوط جداً من الطاقة). تُستخدم كلمة «كتلة» أيضاً لتعني «جسماً مصنوعاً من الكتلة»، في السياقات التي يكون فيها القصور الذاتي للجسم مهماً.
قوانين ماكسويل للكهر ومغناطيسية	Maxwell's laws of electromagnetism	مجموعة قوانين الفيزياء التي وحد بها جيمس كليرك ماكسويل جميع الظواهر الكهرومغناطيسية. ومن هذه القوانين يمكن التنبؤ -من خلال الحسابات الرياضية- بسلوك الكهرباء والمغناطيسية والموجات الكهرومغناطيسية.
مبدأ فوق	metaprinciple	مبدأ يجب أن تخضع له جميع القوانين الفيزيائية. مبدأ النسبية هو مثال على المبدأ الفوقي.
ميكروثانية	microsecond	جزء من مليون من الثانية.
الموجات الميكروية	microwaves	الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يكون طوله الموجي أقصر قليلاً من موجات الراديو؛ انظر الشكل ص 2 في الصفحة...
درب التبانة (اللبنانة)	Milky Way	المجرة التي نعيش فيها.

مفردة ميكسماستر/ مضرب البيض	mixmaster singularity	مفردة يتأرجح بالقرب منها المد والجزر بفعل الجاذبية بشكل عشوائي مع مرور الزمن، ولكنها لا تتغير بالضرورة في المكان. انظر أيضًا مفردة BKL.
جزيء	molecule	كيان مكون من عدة ذرات تتقاسم سحبا الإلكترونية مع بعضها. الماء هو جزيء مصنوع بهذه الطريقة من ذرتي هيدروجين وذرة واحدة من الأكسجين.
الفم	mouth	مدخل إلى الثقب الدودي. يوجد فم عند كل طرف من طرفي الثقب الدودي.
مفردة عارية	naked singularity	مفردة ليست داخل ثقب أسود (غير محاطة بأفق الثقب الأسود)، وبالتالي يمكن رؤيتها ودراستها من قبل شخص خارجها. انظر حدسية الرقابة الكونية.
المؤسسة الوطنية للعلوم	National Science Foundation (NSF).	وكالة تابعة لحكومة الولايات المتحدة مكلفة بدعم البحث العلمي الأساسي.
فيلسوف الطبيعة	natural philosopher	عبارة استخدمت على نطاق واسع في القرن السابع عشر والثامن عشر والتاسع عشر لوصف ما نسميه الآن بالعالم.
سديم	nebula	سحابة من الغاز اللامع في الفضاء بين-النجوم. قبل ثلاثينيات القرن العشرين، كان يُعتقد خطأً على نطاق واسع، ولكن ليس عالميًا، أنها سديم (أي من تراب).
النيوترينو	neutrino	جسيم خفيف جدًا يشبه الفوتون، إلا أنه نادرًا ما يتفاعل مع المادة. فالنيوترينوات المنتجة في مركز الشمس، على سبيل المثال، تطير عبر المادة المحيطة بالشمس من دون أن تُمتص أو تُشتت على الإطلاق.
النيوترون	neutron	جسيم دون ذري. تشكل النيوترونات والبروتونات المتماصة معًا بواسطة القوة النووية، أنوية الذرات.
قلب (لب) نيوتروني	neutron core	الاسم الذي أطلقه أوبنهايمر على النجم النيوتروني. ويوجد أيضًا نجم نيوتروني في مركز النجم العادي.
نجم نيوتروني	neutron star	نجم ضخم مثل الشمس تقريبًا ولكن محيطه يتراوح بين 50 إلى 1000 كيلومتر فقط، ومكون من نيوترونات متراصة معًا بإحكام بقوة الجاذبية.
الميكانيكا الكمومية الحديثة	new quantum mechanics	النسخة النهائية لقوانين الميكانيكا الكمومية، التي وضعت صياغتها عام 1926.
قوانين نيوتن للفيزياء	Newtonian laws of physics	قوانين الفيزياء، المبينة على مفهوم نيوتن للمكان والزمن باعتبارهما مطلقين، والتي كانت محور التفكير في الكون في القرن التاسع عشر.
قوانين نيوتن للجاذبية	Newton's law of gravity	انظر قانون التربيع العكسي للجاذبية.

التخمين في الستينيات والسبعينيات (والذي ثبت صحته في السبعينيات والثمانينيات) بأن جميع خصائص الثقب الأسود تحدد بشكل فريد من خلال كتلته، وشحنته الكهربائية، ودورانه.	no-hair conjecture	حدسية عدم وجود شعر
خاصية الجمع بطريقة أكثر تعقيداً من الجمع البسيط.	nonlinear	اللا خطي
انفجار ضوئي لاعم من نجم قديم، يُعرف الآن أنه ناجم عن انفجار نووي في الطبقات الخارجية للنجم.	nova	مستعر
تفاعلات الاندماج النووي التي تُبقي النجوم ساخنة وتزود القنابل الهيدروجينية بالطاقة.	nuclear burning	احتراق نووي
ويسمى أيضًا «التفاعل القوي». القوى بين البروتونات والنيوترونات، والبروتونات والنيوترونات، والنيوترونات والنيوترونات، والتي تربط الأنوية الذرية معًا. عندما تكون الجسيمات بعيدة بعض الشيء عن بعضها، تكون القوى النووية متجاذبة؛ عندما تكون أقرب تصبح متنافرة. القوى النووية مسؤولة عن الكثير من الضغط بالقرب من مركز النجم النيوتروني.	nuclear force	القوة النووية
اندماج عدة أنوية ذرية لتكوين نواة أكبر (الاندماج)، أو تفكك نواة أكبر لتكوين عدة أنوية أصغر (الانشطار).	nuclear reaction	التفاعل النووي
جهاز يستخدم التفاعل المتسلسل للانشطارات النووية لتوليد الطاقة، وإنتاج البلوتونيوم، وفي بعض الحالات إنتاج الكهرباء.	nuclear reactor	المفاعل النووي
النيوترون أو البروتون.	nucleon	نوية (نيكلون)
النواة الكثيفة للذرة. تحتوي النوى الذرية على شحنة كهربية موجبة، وتتكون من النيوترونات والبروتونات، وترتبط ببعضها بواسطة القوى النووية.	nucleus, atomic	النواة، الذرية
شخص (عادةً افتراضي) أو كائن يقيس.	observer	الراصد (المراقب)
النسخة المبكرة من قوانين الميكانيكا الكمومية، تطورت في العقدين الأولين من القرن العشرين.	old quantum mechanics	الميكانيكا الكمومية القديمة
عالم فلك يراقب الكون باستخدام الضوء المرئي (الضوء الذي يمكن رؤيته بالعين البشرية).	optical astronomer	عالم الفلك البصري
الوقت الذي يستغرقه جسم ما، في مدار حول آخر، لبطوق رفيقه مرة واحدة.	orbital period	الزمن المداري
مجموعة من الأدوات التي يستخدمها مجتمع من العلماء في أبحاثه حول موضوع معين، وفي إيصال نتائج أبحاثه إلى الآخرين.	paradigm	نموذج / أنموذج (مجموعة من الصيغ الرياضية)

جسيم	particle	كائن صغير؛ إحدى الوحدات البنائية للمادة (مثل الإلكترون، أو البروتون، أو الفوتون، أو الجرافيتون).
الحضيض الشمسي (نقطة الرأس)	perihelion	الموقع، على مدار الكوكب حول الشمس، والذي يكون فيه أقرب ما يكون إلى الشمس.
انزياح الحضيض الشمسي لكوكب عطارد	perihelion shift of Mercury	الفشل البسيط لمدار عطارد كقطع ناقص في الانغلاق على نفسه، مما يؤدي إلى انزياح في موضع الحضيض الشمسي في كل مرة يمر فيها عطارد عبر الحضيض الشمسي.
تقلب (اضطراب)	perturbation	تشويه بسيط (عن الشكل الطبيعي) لجسم ما أو لانحناء الزمكان حول الجسم.
طرق حساب التقلب	perturbation methods	طرق التحليل رياضياً لسلوك التقلبات الصغيرة لجسم ما، على سبيل المثال، ثقب أسود.
الفوتون	photon	جسيم من الضوء أو أي نوع آخر من الإشعاع الكهرومغناطيسي (الراديو، الميكروويف، الأشعة تحت الحمراء، الأشعة فوق البنفسجية، الأشعة السينية، أشعة جاما)؛ وهو الجسيم الذي يرتبط، وفقاً لازدواجية الموجة/الجسيم، بالموجات الكهرومغناطيسية.
البلورات التي تنتج الكهرباء بفعل الضغط	piezoelectric crystal	بلورة تنتج جهداً كهربائياً عند الضغط عليها أو تمديدها.
ثابت بلانك	Planck's constant	ثابت أساسي، يُشار إليه بـ h ، والذي يدخل في قوانين الميكانيكا الكمومية؛ نسبة طاقة الفوتون إلى تردده الزاوي (أي تردده مضروباً في 2π)؛ 1.055×10^{-27} إرج-ثانية.
ثابت بلانك-ويلر للطول والمساحة والزمن	Planck-Wheeler length, area, and time	الكميات المرتبطة بقوانين الجاذبية الكمومية. طول بلانك-ويلر، $= 1.62 \times 10^{-33}$ سنتيمتر، هو مقياس الطول الذي ينتهي عنده المكان كما نعرفه ويصبح رغوة كمومية. زمن بلانك-ويلر (يقع في طول بلانك-ويلر أو نحو 10-43 ثانية) وهو أقصر فترة زمنية في الوجود؛ وإذا كان هناك حدثان يفصل بينهما أقل من هذا الزمن، لا يستطيع المرء أن يخبر عن أيهما يأتي قبله وأيهما يأتي بعده. تلعب مساحة بلانك-ويلر (مربع طول بلانك-ويلر، أي $10^{-66} \times 2.61$ سنتيمتر مربع) دوراً رئيسياً في إنتروبيا الثقب الأسود. في الصيغ المذكورة أعلاه، $G = 6.670 \times 10^{-8}$ داین-سنتيمتر ² /جرام ² هو ثابت جاذبية نيوتن، و $h = 1.055 \times 10^{-27}$ إرج-ثانية هو ثابت الميكانيكا الكمومية لبلانك، $c = 2.998 \times 10^{10}$ سنتيمتر/ثانية هي سرعة الضوء.

البلازما	plasma	غاز ساخن متأين وموصل للكهرباء.
البلوتونيوم - 239	plutonium-239	نوع محدد من نواة البلوتونيوم الذرية التي تحتوي على 239 بروتونًا ونيوترونًا (94 بروتونًا و145 نيوترونًا).
الاستقطاب	polarization	خاصية تعني أن الموجات الكهرومغناطيسية وموجات الجاذبية مكونة من مكونين، أحدهما يهتز في اتجاه واحد أو مجموعة اتجاهات، والآخر في اتجاه أو مجموعة اتجاهات مختلفة. يُطلق على المكونين اسم استقطابي الموجات.
الجسم المستقطب	polarized body	جسم ذو شحنة كهربائية سالبة تتركز في منطقة واحدة وشحنة موجبة تتركز في منطقة أخرى.
الضوء المستقطب، موجات الجاذبية المستقطبة	polarized light; polarized gravitational waves	موجات الضوء أو الجاذبية التي يغيب فيها أحد الاستقطابين تمامًا (يختفي).
مرحلة ما بعد الدكتوراه	postdoc	زميل ما بعد الدكتوراه؛ الشخص الذي حصل مؤخرًا على درجة الدكتوراه. ويستمر في التدريب على كيفية إجراء البحوث، وعادة ما يكون ذلك تحت إشراف باحث أعلى مرتبة.
الضغط	pressure	مقدار القوة الخارجية التي تنتجها المادة عند ضغطها.
نظرية بريس	Price's theorem	النظرية القائلة بأن جميع خصائص الثقب الأسود التي يمكن تحويلها إلى إشعاع سوف تتحول إلى إشعاع وسوف تشع بعيدًا تمامًا، مما يجعل الثقب «بلا شعر».
الثقب الأسود البدائي	primordial black hole	عادة ما يكون ثقب أسود أقل كتلة بكثير من كتلة الشمس وفي الغالب تكوّن في الانفجار الأعظم.
المبدأ المطلق لسرعة الضوء	principle of absoluteness of the speed of light	مبدأ أينشتاين أن سرعة الضوء هي ثابت كوني/ معمم، وهي نفسها في جميع الاتجاهات، وواحدة في كل إطار مرجعي قصوري، بصرف النظر عن حركة الإطار.
مبدأ التكافؤ	principle of equivalence	المبدأ القائل بأنه في الإطار المرجعي القصوري المحلي في وجود الجاذبية، يجب أن تتخذ فيه جميع قوانين الفيزياء نفس الشكل الذي تتخذه في الإطار المرجعي القصوري في غياب الجاذبية.
مبدأ النسبية	principle of relativity	مبدأ أينشتاين القائل بأن قوانين الفيزياء لا ينبغي أن تكون قادرة على التمييز بين إطار مرجعي قصوري وإطار آخر؛ أي أنها يجب أن تأخذ نفس الشكل في كل إطار مرجعي قصوري. عندما تكون الجاذبية موجودة: يطبق نفس المبدأ، ولكن تلعب الأطر المرجعية القصورية المحلية دور الأطر المرجعية القصورية.

النجم النابض	pulsar	نجم نبوتروني مغنط يلف محوريًا ينبعث منه عمود من الإشعاع (موجات الراديو وأحيانًا الضوء والأشعة السينية أيضًا). في أثناء دوران النجم حول محوره، يسمح شعاعه الفضاء/المكان كشعاع ضوء كشاف متحرك؛ وفي كل مرة يمر فيها الشعاع بالأرض، يتلقى علماء الفلك نبضة من الإشعاع.
نبض	pulsation	اهتزاز أو تذبذب جسم ما، على سبيل المثال، ثقب أسود أو نجم أو جرس.
المجال الكمومي	quantum field	مجال تحكمه قوانين الميكانيكا الكمومية. جميع المجالات، عند قياسها بدقة كافية، تتحول إلى مجالات كمومية، ولكن عند قياسها بدقة متواضعة، فإنها قد تنصرف بشكل كلاسيكي (أي أنها لا تظهر ازدواجية الموجة/الجسيم أو تقلبات الفراغ).
قوانين المجالات الكمومية في انحناءات الزمكان	quantum fields in curved spacetime, the laws of	زواج جزئي بين النسبية العامة (الزمكان المنحني) وقوانين المجالات الكمومية، حيث تعتبر موجات الجاذبية والمجالات غير الجذبوية جزأين من الميكانيكا الكمومية، في حين أن الزمكان المنحني الذي توجد فيه يعتبر كلاسيكيًا.
الرغوة الكمومية	quantum foam	بنية احتمالية تشبه الرغوة في الفضاء والتي ربما تشكل قلوب المفردات، ومن المحتمل أن تحدث في الفضاء العادي على مقاييس طول بلانك ويلر وأقل.
الجاذبية الكمومية	quantum gravity	قوانين الفيزياء التي نحصل عليها من خلال دمج «الزواج» بين النسبية العامة والميكانيكا الكمومية.
الميكانيكا الكمومية	quantum mechanics	قوانين الفيزياء التي تحكم العالم الضئيل (الذرات، الجزيئات، الإلكترون، البروتونات)، والتي تختبئ أيضًا خلف العالم العملاق، لكنها نادرًا ما تظهر فيه. ومن بين الظواهر التي تنبأ بها الميكانيكا الكمومية مبدأ عدم التأكد، وازدواجية الموجة/الجسيم، وتقلبات الفراغ.
اللاهدم الكمومي	quantum nondemolition	طريقة قياس تتحايل على الحد الكمومي القياسي.
النظرية الكمومية	quantum theory	هي نفسها الميكانيكا الكمومية.
النجم الزائف	quasar	جسم مضغوط شديد الإضاءة في الكون البعيد، يُعتقد أنه يستمد طاقته من ثقب أسود عملاق.
الإشعاع	radiation	أي شكل من أشكال الجسيمات أو الموجات عالية السرعة.
عالم الفلك الراديوي	radio astronomer	عالم الفلك الذي يدرس الكون باستخدام موجات الراديو.
المجرات الراديوية	radio galaxy	مجرات تبث موجات راديو قوية.

جهاز يتكون من عدة تلسكوبات راديوية مرتبطة ببعضها، ويحاكي تلسكوبًا راديويًا واحدًا أكبر بكثير.	radio interferometer	جهاز قياس التداخل باستخدام الموجات الراديوية
أي جسم فلكي يصدر موجات راديوية.	radio source	مصدر لموجات الراديو (مصدر راديوي)
تلسكوب يرصد الكون باستخدام موجات الراديو.	radio telescope	التلسكوب الراديوي
موجات كهرومغناطيسية ذات تردد منخفض جدًا، يستخدمها الإنسان لنقل الإشارات الراديوية، ويستخدمها علماء الفلك لدراسة الأجسام الفلكية البعيدة؛ انظر الشكل ص 2 في الصفحة...	radio waves	الموجات الراديوية
انزياح أو تحول الموجات الكهرومغناطيسية إلى أطوال موجية أطول؛ أي «احمرار» الموجات.	redshift	الانزياح الأحمر
مختبر (ربما وهمي) لإجراء القياسات الفيزيائية، والذي يتحرك عبر الكون بطريقة معينة.	reference frame	الإطار المرجعي
يعتمد على الإطار المرجعي للفرد؛ مختلف، إذا قيس في إطار واحد يتحرك عبر الكون بطريقة ما، عن قياسه في إطار آخر يتحرك بطريقة أخرى.	relative	نسبي
أو ببساطة المقاومة. وتسمى أيضًا المؤشر الأديباتي. وهي النسبة المئوية التي يزداد بها الضغط داخل المادة عند زيادة كثافتها بنسبة 1 بالمائة.	resistance to compression	مقاومة الانضغاط
درجة عالية من الدقة والانضباط والموثوقية (مصطلح ينطبق على الحسابات والحجج الرياضية).	rigor; rigorous	دقيق، صارم
الطاقة المرتبطة باللف المحوري لثقب أسود أو نجم أو أي جسم آخر.	rotational energy	الطاقة الدوارة
هندسة الزمكان حول وداخل ثقب كروي غير دوار.	Schwarzschild geometry	هندسة شفارتشيلد
العبارة المستخدمة بين عامي 1916 و 1958 تقريبًا لوصف ما نسميه الآن بالثقب الأسود.	Schwarzschild singularity	مفردة شفارتشيلد
النجم الأكثر سطوعًا بالأشعة السينية في السماء.	Sco X-1 Sco X-1 Scorpius X-1	العقرب س 1-
قانون ينص على أن الإنتروبيا لا يمكن أن تنخفض أبدًا بل إنها تزيد دائمًا تقريبًا.	second law of thermodynamics	القانون الثاني للديناميكا الحرارية
أضعف إشارة يمكن قياسها بواسطة بعض الأجهزة. ويمكن التعبير عنها باعتبار أنها قدرة الجهاز على قياس الإشارات.	sensitivity	الحساسية

الحساس (جهاز التقاط الحساسة)	sensor	جهاز لمراقبة اهتزازات القضيب أو حركات الكتلة.
صدمة غازية (غاز الصدمة)	shocked gas	الغاز الذي سخن وضغط في جبهة الصدمة.
جبهة الصدمة	shock front	مكان، في الغاز المتدفق، تقفز فيه كثافة الغاز ودرجة حرارته فجأة إلى الأعلى بمقدار كبير.
انهيار التزامن	simultaneity breakdown	حقيقة أن الأحداث التي تكون متزامنة إذا قيس في إطار مرجعي واحد، ليست متزامنة إذا قيس في إطار آخر يتحرك بالنسبة إلى الأول.
المفردة	singularity	منطقة من الزمكان يصبح فيها انحناء الزمكان قويًا جدًا بحيث تنهار قوانين النسبية العامة وتصبح قوانين الجاذبية الكمومية هي المهيمنة. إذا حاول المرء وصف المفردة باستخدام النسبية العامة وحدها، فسيجد (بشكل غير صحيح) أن المد والجزر بفعل الجاذبية وانحناء الزمكان قويان بشكل لا نهائي هناك. من المحتمل أن تحل الجاذبية الكمومية محل هذه اللاتناهيات باستخدام مفهوم الرغوة الكمومية.
الشعري اليمانية ب	Sirius B	نجم من فئة القزم الأبيض يدور حول نجم الشعري اليمانية.
الزمكان	spacetime	«النسيج» رباعي الأبعاد الذي ينتج عند توحيد المكان والزمن.
انحناءات الزمكان	spacetime curvature	خاصية الزمكان التي تجعل الجسيمات التي تسقط سقوطًا حرًا والتي تتحرك في البداية على طول خطوط عالمية متوازية تتحرك فيما بعد معًا أو تتباعد. إن انحناء الزمكان وجاذبية المد والجزر بفعل الجاذبية هما اسمان مختلفان لنفس الشيء.
رسم تخطيطي للزمكان	spacetime diagram	رسم تخطيطي يوضح الزمن المرسوم لأعلى والمكان المرسوم أفقيًا.
النسبية الخاصة	special relativity	قوانين أينشتاين الفيزيائية في غياب الجاذبية.
الخطوط الطيفية	spectral lines	التقسيمات الحادة في طيف الضوء المنبعث من بعض المصادر. ترجع هذه التقسيمات إلى الانبعاث أو الامتصاص القوي عند أطوال موجية محددة، والتي تنتجها ذرات أو جزيئات محددة.
مطياف	spectrograph	نسخة متطورة من منشور فصل الألوان المختلفة (الأطوال الموجية) للضوء وبالتالي قياس طيف الضوء.

نطاق طيفي	spectrum	نطاق الأطوال الموجية أو الترددات التي يمكن أن توجد فيها الموجات الكهرومغناطيسية، والتي تمتد من موجات الراديو ذات التردد المنخفض للغاية حتى الضوء إلى أشعة جاما عالية التردد للغاية؛ انظر الشكل ص2 في المقدمة. وأيضًا صورة لتوزيع الضوء كدالة في التردد (أو الطول الموجي)، يمكننا إنتاجها عن طريق إرسال الضوء عبر المنشور.
اللف المحوري (الدوران)	spin	اللف المحوري، انظر كمية الحركة الزاوية.
الاستقرار	stability	مسألة ما إذا كان الكائن/ الجسم غير مستقر أم لا. انظر أيضًا عدم الاستقرار.
الحدود الكمومية القياسية	standard quantum limit	حد، يتسبب فيه مبدأ عدم التأكد، لمدى دقة قياس كميات معينة باستخدام الطرق القياسية. يمكن التحايل على هذا الحد باستخدام طرق اللا هدم الكمومي.
قياس الاستروبوسكوبي	stroboscopic measurement	نوع محدد من القياس الكمومي اللا هدمي والذي فيه تجري سلسلة من القياسات السريعة جدًا لقضيب مهتز. كل قياس مفصول بفترة اهتزاز واحدة.
هيكل النجم (تركيبه)	structure of a star	تفاصيل كيفية تغير ضغط النجم وكثافته ودرجة حرارته وجاذبيته عند الانتقال إلى الداخل (من سطحه إلى مركزه).
القبلة الفائقة	superbomb	قبلة هيدروجينية تستخدم مبدأ يمكن من خلاله إنتاج انفجار كبير بشكل غير محدود.
التوصيلية الفائقة	superconductor	مادة موصلة للكهرباء بشكل مثالي، من دون أي مقاومة كهربية.
النجم فائق الكتلة	supermassive star	نجم افتراضي يزن ما يعادل أو أكثر من 10000 شمس.
المستمر الأعظم - النجوم المستمرة	supernova	انفجار هائل لنجم يحتضر. وهو انفجار الطبقات الخارجية للنجم مدعوم بالطاقة التي تطلق عندما يتفجر القلب الداخلي للنجم ليشكل نجمًا نيوترونيًا.
جاذبية السطح	surface gravity	بشكل تقريبي، قوة سحب الجاذبية التي يشعر بها الراصد الساكن فوق أفق الثقب الأسود. (بتعبير أدق: قوة الجاذبية مضروبة في مقدار تمدد زمن بفعل الجاذبية عند موقع الراصد).
إشعاع المسرع الدوراني (التزامني)	synchrotron radiation	الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة من الإلكترونات عالية السرعة التي تلتف حول نفسها وحول خطوط المجال المغناطيسي.
الضغط الحراري	thermal pressure	الضغط الناتج عن الحركات العشوائية الناجمة عن الحرارة للذرات والجزيئات والإلكترونات و/ أو الجزيئات الأخرى.

الديناميكا الحرارية	thermodynamics	مجموعة القوانين الفيزيائية التي تحكم السلوك الإحصائي العشوائي لأعداد كبيرة من الذرات والجزيئات، بما في ذلك حرارتها.
التفاعلات النووية الحرارية	thermonuclear reactions	التفاعلات النووية الناجمة عن الحرارة.
المد والجزر بفعل الجاذبية (قوى المد والجزر بأثر الجاذبية)	tidal gravity	تسارع أو «عجلة» الجاذبية التي تضغط على الأجسام في بعض الاتجاهات وتمدها في اتجاهات أخرى. عد المد والجزر اللذان تنتجهما جاذبية القمر والشمس مسؤولين عن المد والجزر في محيطات الأرض.
تمدد الزمن	time dilation	تباطؤ تدفق الزمن/ الوقت.
آلة الزمن	time machine	جهاز للسفر عبر الزمن إلى الماضي/الوراء. في لغة الفيزيائيين، «منحنى مغلق يشبه الزمن».
الطوبولوجي أو البنية	topology	فرع من الرياضيات يتعامل مع الطرق النوعية التي ترتبط بها الأشياء ببعضها أو بنفسها. على سبيل المثال، تميز الطوبولوجيا الكرة المصمتة (التي ليس بها ثقب) عن الدونات (التي بها ثقب).
تريتيوم	tritium	هي التي تتكون أنويتها الذرية من بروتون واحد ونيوترونين مرتبطين معاً بالقوة النووية.
الأشعة فوق البنفسجية	ultraviolet radiation	الإشعاع الكهرومغناطيسي ذو الطول الموجي الأقصر قليلاً من الضوء؛ انظر الشكل ص 2 في الصفحة...
مبدأ عدم التأكد	uncertainty principle	قانون الميكانيكا الكمومية الذي ينص على أنه إذا قاس شخص ما تموضع جسم ما أو قوة المجال بدقة عالية، فإن قياسه يجب بالضرورة أن يغير من سرعة الجسم أو معدل تغير المجال بمقدار لا يمكن التنبؤ به.
الكون	universe	منطقة من الفضاء/ المكان منفصلة عن جميع مناطق الفضاء/ المكان الأخرى، تمامًا كما تنفصل الجزيرة عن جميع أجزاء الأرض الأخرى.
كوننا	Universe	
كوننا	Our universe	
غير مستقر	unstable	من خصائص الجسم أنه إذا حدث اضطراب طفيف فيه، فإن الاضطراب سينمو بشكل أكبر، وبالتالي يغير الجسم بشكل كبير وربما يدمره. ويسمى أيضًا، في مصطلحات أكثر اكتمالاً، «غير مستقر ضد الاضطرابات الصغيرة».
اليورانيوم - 235	uranium-255	نوع محدد من نواة اليورانيوم يحتوي على 235 بروتونًا ونيوترونًا (92 بروتونًا و143 نيوترونًا).

الفراغ	vacuum	منطقة من الزمكان أزيلت منها كل الجزيئات والمجالات والطاقة التي يمكن إزالتها؛ الأشياء الوحيدة المتبقية هي تقلبات الفراغ التي لا يمكن إزالتها.
تقلبات فراغية	vacuum fluctuations	تذبذبات للمجال عشوائية وغير متوقعة وغير قابلة للإزالة (على سبيل المثال، المجال الكهرومغناطيسي أو مجال الجاذبية)، والتي تنتج عن لعبة شد الحبل حيث تسرق مناطق صغيرة من الفضاء الطاقة للحظات من المناطق المجاورة ثم تعيدها. انظر أيضًا الفراغ والجسيمات الافتراضية.
الجسيمات الافتراضية	virtual particles	الجسيمات التي تنشأ في أزواج باستخدام الطاقة المستعارة من منطقة قريبة من الفضاء/ المكان. تتطلب قوانين الميكانيكا الكمومية أن تسترجع الطاقة بسرعة، وبالتالي فإن الجسيمات الافتراضية تفتي بسرعة ولا يمكن التقاطها. الجسيمات الافتراضية هي الجانب المتجسد لتقلبات الفراغ، كما يراها الراصدون الذين يسقطون سقوطاً حراً. الفوتونات الافتراضية والجرافيتونات الافتراضية هي الجوانب الجسيمية لتقلبات الفراغ الكهرومغناطيسي وتقلبات فراغ الجاذبية، على التوالي. انظر أيضًا ازدواجية الموجة/ الجسيم.
اعوجاج الزمكان	warping of spacetime	نفس انحناء الزمكان.
موجة	wave	تذبذب في مجال ما (على سبيل المثال، المجال الكهرومغناطيسي أو انحناء الزمكان) ينتشر عبر الزمكان.
الأشكال الموجية	waveform	منحني يوضح تفاصيل اهتزازات الموجة.
الطول الموجي	wavelength	المسافة بين قمم الموجة.
ازدواجية الموجة/ الجسيم	wave/particle duality	الحقيقة هي أن جميع الموجات تتصرف أحياناً مثل الجسيمات، وجميع الجسيمات أحياناً تتصرف مثل الموجات.
نجم القزم-الأبيض	white-dwarf star	نجم يبلغ محيطه محيط الأرض تقريباً وكتلة الشمس، وقد استنفد كل وقوده النووي وبدأ يبرد تدريجياً. إنه يدعم ذاته ضد ضغط جاذبيته عن طريق ضغط انتكاس الإلكترون.
الخط العالمي (العمومي)	world line	مسار جسم ما عبر الزمكان أو من خلال مخطط الزمكان.
الثقب الدودي	wormhole	«نفق» في طوبولوجيا الفضاء/ المكان، يربط بين موقعين منفصلين على نطاق واسع في كوننا.
الأشعة السينية (أشعة إكس)	X-rays	موجات كهرومغناطيسية يتراوح طولها الموجي بين طول الأشعة فوق البنفسجية وأشعة جاما؛ انظر الشكل ص 2 في الصفحة...

الملاحظات

ما الذي يجعلني متأكدًا مما كتبت؟

المصادر والاختصارات

المصادر المذكورة في هذه الملاحظات مذكورة في قائمة المراجع.
الاختصارات المستخدمة في هذه الملاحظات هي:

ECP-1: الأوراق المجمعة لألبرت أينشتاين، المجلد الأول، مذكورة في المراجع باسم ECP-1.

ECP-2: الأوراق المجمعة لألبرت أينشتاين، المجلد 2، مذكورة في المراجع باسم ECP-2.

INT: مقابلات أجراها المؤلف، مدرجة في بداية قائمة المراجع.

MTW: ميسنر، ثورن، ويلر (1973).

المقدمة

[من بين كل المفاهيم... العنبر عليها].

هذه الفقرة مقتبسة من ثورن (1974).

[ومن الفترة المدارية والمحيط... («10 كتل شمسية»)].

صيغة نيوتن هي:

$$M_h = C_o^3 / (2\pi G P_o^2)$$

حيث M_h هي كتلة الثقب (أو أي جسم آخر له جاذبية)، و P_o و C_o هما محيط ودورة أي مدار دائري حول الثقب.

π تساوي 3.14159... و G هو ثابت جاذبية نيوتن، وهو 1.327×10^{11} كيلومتر³ في الثانية² لكل كتلة شمسية.

انظر الملاحظة في الصفحة 6 أدناه. وبإدخال الفترة المدارية للمركبة الفضائية $Po = 5$ دقائق و 46 ثانية في هذه الصيغة، ومحيطها المداري $Co = 10^6$ كيلومتر، يكون الناتج هو $Mh = 10$ أي 10 أمثال كتلة شمسية. (كتلة الشمس الواحدة تساوي 1.989×10^{30} كيلوجرام).

[أما بالنسبة إلى الحجم... بوحدات كتلة الشمس].

صيغة محيط الأفق هي:

$Ch = 4\pi GM_h/c^2 = 18.5$ كيلومتر $\times (M_h/M_\odot)$ ، حيث M_h هي كتلة الثقب، و G هو ثابت جاذبية نيوتن (انظر أعلاه)، $c = 2.998 \times 10^8$ كيلومتر لكل ثانية وهي سرعة الضوء، و $M_\odot = 1.989 \times 10^{30}$ كيلوجرام هي كتلة الشمس. انظر على سبيل المثال الفصلين 31 و 32 من MTW. [تكريمًا للمد والجزر... قوة المد والجزر].

قوة المد والجزر، معبرًا عنها بالتسارع النسبي بين رأسك وقدمك (أو بين أي جسمين آخرين)، هي $\Delta a = 16\pi^3 G(M_h/C^3)L$ ، حيث G هو ثابت جاذبية نيوتن (انظر أعلاه)، M_h هي كتلة الثقب الأسود، و C هو المحيط الذي تتموضع فيه، و L هي المسافة بين رأسك وقدمك. لاحظ أن 1 جاذبية أرضية تساوي 9.81 متر في الثانية². انظر، على سبيل المثال، الصفحة 29 من MTW.

[تنبأ النسبية العامة... تتناقص قوة المد والجزر القريبة من الأفق]. الصيغة أعلاه (ملاحظة للصفحة...) تعطي قوة المد والجزر $\Delta a \propto M_h/C^3$. عندما يكون المحيط قريبًا من الأفق، $C \propto M_h$ (ملاحظة للصفحة...)، إذن $\Delta a \propto 1/M_h^2$.

[ستتطلب الرحلة الكاملة التي تبلغ 30100 سنة ضوئية... 20 عامًا فقط].

يتناسب زمن المركبة الفضائية T_{ship} وزمن الأرض T_E والمسافة D المقطوعة بالعلاقة التالية:

$$T_E = (2c/g) \sinh(gT_{ship}/2c)$$

$$D = (2c^2/g) [\cosh(gT_{ship}/2c) - 1]$$

حيث g هو تسارع السفينة ((جاذبية أرضية واحدة)، 9.81 متر لكل ثانية²))، و c هي سرعة الضوء، و $\sinh$ و $\cosh$ هما جيب تمام الزائد والجيب الزائدي. انظر، على سبيل المثال، الفصل 6 من MTW.

بالنسبة إلى الرحلات التي تستمر لأكثر من عام واحد، تصبح هذه الصيغ تقريبًا $TE = D/c$ و $T_{ship} = D/c$ ، حيث $\ln = (2c/g) \ln(gD/c^2)$ هو اللوغاريتم الطبيعي.

[للبقاء في مدار دائري... دفعتك إلى الداخل].

للحصول على تحليل رياضي للمدارات الدائرية (وغيرها) حول ثقب أسود لا يلف محوريًا، انظر، على سبيل المثال، الفصل 25 من MTW، وخاصة الإطار 25.6.

[تظهر حساباتك... 1.0001 قدر محيط الأفق].

قوة التسارع التي ستشعر بها، في حين تحوم عند محيط C فوق ثقب أسود كتلته M_h ومحيط الأفق C_h ، هي:

$$a = 4\pi^2 G(M_h/0) \times (1/\sqrt{1-C_h/C}),$$

حيث G هو ثابت جاذبية نيوتن. إذا كنت قريباً جداً من الأفق، فإن

$$a \propto {}^{10}\text{Mh} \text{ مما يعني ضمناً } C \simeq C_h \propto M_h,$$

[باستخدام التسارع المعتاد $g - 1$ للنصف الأول من الرحلة...].

انظر الملاحظة الثانية للصفحة 37 أعلاه.

[البقعة صغيرة... كما تشاهدها من الأرض].

عندما يحوم المرء عند محيط C أعلى قليلاً من الأفق بمحيط C_h ، يرى المرء كل الضوء القادم من الكون الخارجي متمركزاً في قرص لامع بقطر زاوي $\alpha = 2\sqrt{1-C_h/C}$ ،

$$\text{زاوية نصف قطرية بالدرجات} \approx 300\sqrt{1-C_h/C}.$$

انظر، على سبيل المثال، الإطار 25.7 من MTW.

[ومن الغريب بنفس القدر أن ألوان جميع النجوم والمجرات غير صحيحة... 5×10^{-7} متر].

عندما يحوم المرء عند محيط C أعلى قليلاً من الأفق بمحيط C_h ، يرى المرء الأطوال الموجية لكل الضوء القادم من الكون الخارجي بانزياح نحو اللون الأزرق (معكوس الانزياح الأحمر بفعل الجاذبية) بمقدار

$$\lambda_{\text{received}} / \lambda_{\text{emitted}} = \sqrt{1-C_h/C}$$

انظر، على سبيل المثال، الصفحة 657 من MTW.

[ويادخال هذه الأرقام في الصيغ... بعد سبعة أيام من الآن].

عندما يدور ثقبان أسودان، كتلة كل منهما M_h ، حول بعضهما وتفصل بينهما مسافة D، فإن لهما فترة مدارية $2\pi\sqrt{D^3/2GM_h}$

ويجبرهما ارتداد موجة الجاذبية على الالتفاف معاً والالتحام بعد زمن.

$$(5/512) \times (c^5/G^3)(D^4/M_h^3)$$

G هو ثابت الجاذبية لنيوتن، و c هي سرعة الضوء؛ انظر أعلى.

انظر على سبيل المثال المعادلة (36.17b) من MTW.

[يبلغ محيط الحلقة 5 ملايين كيلومتر... انحناء الزمكان].

يشعر شخص على حلقة العارضة على مسافة L من طبقتها المركزية بتسارع

$a = (24\pi^3 G M_h / C^3) L$ باتجاه الطبقة المركزية، وينتج ثلثه عن قوة الطرد المركزي للحلقة الدوارة وثلثاه عن طريق قوى المد والجزر للثقب. G هو ثابت الجاذبية لنيوتن، و M_h هو كتلة الثقب، و C هو محيط الطبقة المركزية للحلقة. وللمقارنة فإن 1 من قيمة تسارع الجاذبية الأرضية يساوي 9.81 متر لكل ثانية². انظر الملاحظة في الصفحة... أعلاه.

[تتطلب قوانين الجاذبية الكمومية... بحيث لا يمكن استخدامها للسفر عبر الزمن].

$$\sqrt{G\hbar/c^3} = 1.62 \times 10^{-33} \text{ سم} = \text{«طول بلانك-ويلر»}$$

حيث G = ثابت جاذبية نيوتن، و c = سرعة الضوء، و $\hbar$ = ثابت بلانك = 1.055×10^{-34} كيلوجرام في متر² لكل ثانية. انظر الصفحات... الفصل الرابع عشر. والسبب الآخر هو حقيقة... بكل اختبار بنجاح]. على سبيل المثال انظر ويل (1986).

الفصل الأول

تعليق عام على الفصل الأول: معظم مادة هذا الفصل عن حياة أينشتاين تأتي من السير الذاتية المتفق عليها له: بايس (1982)، هوفمان (1972)، كلارك (1971)، أينشتاين (1949)، فرانك (1947). بالنسبة إلى معظم التوضيحات والاقتباسات التاريخية في الفصل الأول، والتي استخلصتها من هذه السير الذاتية المتفق عليها، فإنني لا أقدم اقتباسات فردية أدناه. أصبحت الكثير من المواد التاريخية الجديدة متاحة مع النشر التدريجي لأوراق أينشتاين البحثية المجمعة، ECP-1، ECP-2، أينشتاين وماريك (1992). وأستشهد أدناه بمواد من هذه المصادر.

(البروفيسور فيلهلم أوستفالد... هيرمان أينشتاين). الوثيقة 99 في ECP-1.

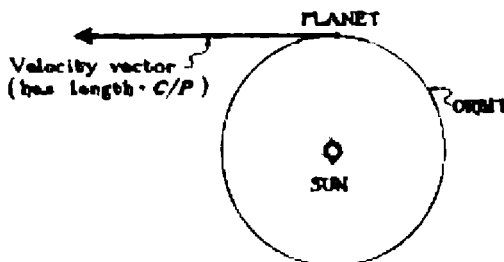
[«الاحترام غير المدروس... عدو الحقيقة»] الوثيقة 115 من ECP-1، كما ترجمت في الصفحة التاسعة عشرة من رين وشولمان (1992).

الحاشية السفلية 1: يوضح المثال التالي المقصود «بالتلاعب رياضياً» بقوانين الفيزياء.

في أوائل القرن السابع عشر، استنتج يوهانس كيبلر، من الملاحظات الرصدية لتايكو براهي للكواكب، أن مكعب محيط C لمدار الكوكب مقسوماً على مربع الفترة المدارية P ؛ أي C^3/P^2 ، هو نفسه بالنسبة إلى الجميع. الكواكب المعروفة آنذاك: عطارد، الزهرة، الأرض، المريخ، المشتري، زحل. وبعد نصف قرن، فسر إسحاق نيوتن اكتشاف كيبلر من خلال التلاعب الرياضي بقوانين نيوتن للحركة والجاذبية (القوانين المذكورة في الصفحة... من النص):

1. من الشكل التوضيحي التالي وبعض الجهد، يستنتج المرء أنه عندما يدور الكوكب حول الشمس، تتغير سرعة الكوكب بمعدل معين في الصيغة الرياضية التالية، (معدل تغير السرعة)

$2\pi C/P^2 = 3.14159 \dots \pi$ يُطلق على معدل التغير في السرعة هذا أحيانًا اسم تسارع الطرد المركزي الذي يواجهه الكوكب الذي يدور حول الشمس.



2. يخبرنا قانون نيوتن الثاني للحركة أن معدل تغير السرعة (تسارع الطرد المركزي) يجب أن يكون مساويًا لقوة الجاذبية، F_{grav} التي تمارسها الشمس على الكوكب، مقسومة على كتلة الكوكب، M_{planet} ؛ بمعنى آخر:

$$2\pi C/P^2 = F_{\text{grav}}/M_{\text{planet}}$$

3. يخبرنا قانون نيوتن للجاذبية أن قوة الجاذبية F_{grav} تتناسب مع كتلة الشمس M_{Sun} مضروبة في كتلة الكوكب M_{planet} مقسومة على مربع محيط مدار الكوكب. ذكر على أنه مساواة وليس تناسبًا:

$$F_{\text{grav}} = 4\pi^2 G M_{\text{Sun}} M_{\text{planet}} / C^2$$

هنا G هو ثابت نيوتن للجاذبية، ويساوي 6.670×10^{-20} كيلومتر³ لكل ثانية² لكل كيلوجرام، أو ما يعادل 1.327×10^{11} كيلومتر³ في الثانية² لكل كتلة شمسية.

4. بإدخال هذا الحد الذي يعبر عن قوة الجاذبية F_{grav} في قانون نيوتن الثاني للحركة (الخطوة 2 أعلاه)، نحصل على:

$$2\pi C/P^2 = 4\pi^2 G M_{\text{Sun}} / C^2$$

وبضرب طرفي هذه المعادلة في $C^2/2\pi$ ، نحصل على $C^3/P^2 = 2\pi G M_{\text{Sun}}$

وهكذا، فإن قوانين نيوتن للحركة والجاذبية تشرح -في الواقع إنها تحقق- أن العلاقة التي اكتشفها كيبلر: C^3/P^2 هي نفسها بالنسبة إلى جميع الكواكب؛ فهي تعتمد فقط على ثابت جاذبية نيوتن وكتلة الشمس.

وكمثال على قوة قوانين الفيزياء، فإن التلاعبات المذكورة أعلاه لا تفسر اكتشاف كيبلر فحسب، بل تقدم لنا أيضًا طريقة لوزن الشمس. من خلال قسمة المعادلة النهائية في الخطوة 4 على $2\pi G$ نحصل على معادلة لكتلة الشمس

$$M_{\text{Sun}} = C^3/(2\pi G P^2).$$

في هذه المعادلة من خلال إدخال محيط C والفترة المدارية P لأي كوكب كما قاسها علماء

الفلك وقيمة ثابت جاذبية نيوتن G كما قاسها الفيزيائيون في المختبرات المرتبطة بالأرض، نستنتج أن كتلة الشمس هي 1.989×10^{30} كيلوجرام.

«لقد ألقى فيبر... كل فصل دراسي له» الوثيقة 39 في ECP-1؛ الوثيقة 2 في أينشتاين وماري (1992).

[وحيث إن الأثير... ساكن في الفضاء المطلق].

في هذا الفصل، أتجاهل تكهنات بعض الفيزيائيين في أواخر القرن التاسع عشر بأن الأثير في محيط الأرض قد يُسحب بسبب حركة الأرض عبر المكان المطلق. في الواقع، هناك أدلة تجريبية قوية ضد هذا السحب: إذا كان الأثير بالقرب من سطح الأرض في حالة سكون بالنسبة إلى الأرض، لا ينبغي أن يكون هناك انحراف في ضوء النجوم، لكن الانحراف الناتج عن حركة الأرض حول الشمس كان حقيقة راسخة. للحصول على مناقشة مختصرة لتاريخ الأفكار حول الأثير، انظر الفصل السادس من كتاب بايس (1982)؛ لمزيد من المناقشات التفصيلية، راجع المراجع المذكورة فيه.

[ألبرت مايكلسون... من اختراعه].

لم تكن التكنولوجيا في زمن مايكلسون قادرة على مقارنة سرعات الضوء (في اتجاه واحد) عبر اتجاهات مختلفة بدقة كافية (جزء واحد من 104) لاختبار تنبؤ فيزياء نيوتن. ومع ذلك، كان هناك تنبؤ مماثل بوجود اختلاف في سرعات الضوء ذهابًا وإيابًا (نحو 5 أجزاء في 109 فروق في الانتقال ذهابًا وإيابًا موازية لحركة الأرض عبر الأثير وواحدة متعامدة). كانت تقنية مايكلسون الجديدة مناسبة بشكل مثالي لقياس مثل هذه الاختلافات في انتقالات الذهاب والإياب؛ لقد كانت ما بحث عنه مايكلسون ولم يتمكن من العثور عليه.

ومن خلال مقارنتها بتجارب أخرى، كانت التجارب الأخرى مثل قياسات انحراف ضوء النجوم، التي تشير ضمناً إلى أن الأثير لا تسحبه الأرض؛ انظر الملاحظة على الصفحة... أعلاه.

[إن انكماشًا طفيفًا (خمس أجزاء من المليار)... تجربة مايكلسون ومورلي].

تذكر (لاحظ الصفحة...) أن مايكلسون كان في الواقع يقيس سرعات الضوء ذهابًا وإيابًا ويبحث عن اختلافات باتجاهات تبلغ نحو خمسة أجزاء من المليار.

هذه المناقشة لقانون «لا نهاية لخطوط المجال المغناطيسي»، والمناقشة الأكثر تفصيلاً في الشكل 1.1، هي ترجمتي الخاصة، إلى اللغة التصويرية الحديثة، لأحد جوانب مسألة معادلات ماكسويل التي ناضل معها لورنتز، ولارمور، وبوانكاريه. لمزيد من المناقشة الدقيقة لهذه القضية ونضالهم، انظر الصفحات 123-130 من بايس (1982).

ولجعل القوانين جميلة لا يتطلب الأمر فقط انكماش الأجسام المتحركة وتمدد زمنها، بل يتطلب أيضًا التظاهر بأن مفهوم التزامن نسبي؛ أي أن التزامن يعتمد على حالة حركة الفرد، وقد أولى لورنتز ولارمور وبوانكاريه اهتمامًا كبيرًا بهذا، بالإضافة إلى انكماش الطول وتمدد الزمن. ومع ذلك،

من أجل البساطة التعليمية، أتجاهل هذا في النص وأتناول مسألة التزامن في وقت لاحق إلى حد ما في الفصل الأول.

الوثيقة 52 في ECP-1؛ الوثيقة 8 في أينشتاين وماريك (1992).

أنا هنا أتكهن. ليس من المعروف حقاً إلى أي مدى ركز عقل أينشتاين على هذه القضايا خلال الفترة 1899-1905. وكما يوضح بايس ((1982، القسم 6 b))، لم يكن أينشتاين خلال هذه السنوات الست على علم باستنتاج لورنتز-بوانكاريه-لارمور لانكماش الطول وتمدد الزمن من قوانين ماكسويل. من الناحية العلمية، كان على علم باشتقاق لورنتز لتحويل لورنتز إلى الدرجة الأولى في السرعة (بما في ذلك انهيار التزامن)، ولكن ليس إلى الدرجة الثانية حيث يحدث انكماش الطول وتمدد الزمن. ومن ناحية أخرى، فمن المفترض أنه كان على علم باستدلال فيتزجيرالد-لورنتز لانكماش الطول من تجربة مايكلسون-مورلي؛ ونحن نعلم أنه في ورقته البحثية لعام 1905 حول النسبية الخاصة، قدم اشتقاقاً خاصاً به لتحويل لورنتز الكامل، الذي يحقق كل المتطلبات، ولانكماش الطول، وتمدد الزمن، وانهيار التزامن.

وصف لشخصية ماريك يعتمد إلى حد كبير على رسائل الحب بينها وبين أينشتاين، انظر رين وشولمان (1992)؛ لرسائل الحب انظر ECP-1 أو ماريك وأينشتاين (1992).

الوثيقة 94 من ECP-1؛ الوثيقة 95 لأينشتاين وماريك (1992).

الوثيقة 100 من ECP-1.

الوثيقة 138 من ECP-1.

الوثيقة 125 من ECP-1.

الوثيقة 104 من ECP-1.

رين وشولمان (1992)، أينشتاين وماريك (1992).

أعتقد، بناءً على العديد من السير الذاتية لأينشتاين، أنه قضى معظم ساعات فراغه بهذه الطريقة.

سيليج (1956)، كما نقله كلارك (1971).

لكن انظر المناقشة، في الصفحة السادسة والعشرين من كتاب رين وشولمان (1992)، حول المساهمات التي قدمها بيسو لعمل أينشتاين.

القسم 2 من الوثيقة 23 من ECP-2.

انظر، على سبيل المثال، الملحق في ويل (1986).

كما يوضح بايس (1982)، القسم 6 (b)، صاغ هنري بوانكاريه نسخة بدائية من مبدأ النسبية (أطلق عليه اسم «مبدأ النسبية») قبل أينشتاين بعام واحد، لكنه لم يكن على علم بأهمية قوة مبدأ النسبية.

الوثيقة 23 من ECP-2.

الفصل الثاني

تعليق عام على الفصل الأول: معظم مادة هذا الفصل عن حياة أينشتاين تأتي من السير الذاتية المتفق عليها له: بايس (1982)، هوفمان (1972)، كلارك (1971)، أينشتاين (1949)، فرانك (1947). بالنسبة إلى معظم التوضيحات والاقتباسات التاريخية في الفصل الأول، والتي استخلصتها من هذه السير الذاتية المتفق عليها، فإنني لا أقدم اقتباسات فردية أدناه. أصبحت الكثير من المواد التاريخية الجديدة متاحة مع النشر التدريجي لأوراق أينشتاين البحثية المجمعة، ECP-1، ECP-2. وأستشهد أدناه بمواد من هذه المصادر.

إن الطريق الفكري الذي اتبعه أينشتاين للانتقال من النسبية الخاصة إلى النسبية العامة هو في الأساس ما وصف في هذا الفصل. ومع ذلك، فقد بسّطت بالضرورة طريقه إلى حد كبير؛ ومن أجل الوضوح، فقد وصفت الطريق باللغة الحديثة وليس باللغة التي استخدمها أينشتاين. من أجل إعادة بناء تاريخية دقيقة للمسار الفكري لأينشتاين، انظر بايس (1982).

ألقى خطاب هيرمان مينكوفسكي في جمعية الثمانين لعلماء الطبيعة والأطباء الألمان، في كولونيا، في 21 سبتمبر 1908. وقد نُشرت ترجمة باللغة الإنجليزية في لورنتز، وأينشتاين، ومينكوفسكي، وويل (1923).

بدا أن القمر يتسارع بشكل طفيف للغاية في حركته حول الأرض، وهو تأثير لم يتمكن قانون نيوتن للجاذبية من تفسيره. في عام 1920، أدرك تيلور وجيفريز أن القمر لم يكن يتسارع في الواقع. بل كان دوران الأرض يتباطأ بسبب قوة جاذبية القمر على الماء ذي المد العالي في محيطات الأرض. ومن خلال مقارنة حركة القمر الثابتة بدوران الأرض البطيء، استنتج علماء الفلك بشكل غير صحيح تسارع القمر. انظر سمارت (1953).

نشرت ترجمة إنجليزية لمقال المراجعة الجميل لأينشتاين في الوثيقة رقم 47 من ECP-2.

نُشرت حجة أينشتاين كما وردت في الإطار 2.4 في الأصل في أينشتاين (1911).

الوثيقة 47 من ECP-2.

انظر فرانك (1947)، الصفحات 89-91.

أينشتاين (1915).

الإطار 2.6: ملاحظة للقراء الذين هم على دراية بالصيغة الرياضية للنسبية العامة: وصف معادلة المجال لأينشتاين الواردة في هذا الإطار يتوافق مع العلاقة الرياضية

$$R_{ii} = 4\pi G(T_{ii} + T_{xx} + T_{yy} + T_{zz}),$$

حيث R_{ii} هي القيمة مكون «الزمن-الزمن» في موتر انحناء ريتشي، G هو ثابت جاذبية نيوتن، T_{ii} هي كثافة الكتلة المعبر عنها بوحدات الطاقة (انظر الإطار 5.2)، و $T_{xx} + T_{yy} + T_{zz}$ هو مجموع الضغوط الرئيسية على طول ثلاثة اتجاهات متعامدة.

انظر الصفحة 406 من MTW. إن مكون «الزمن-الزمن» في معادلة مجال أينشتاين، عند فرضه في جميع الأطر المرجعية، يضمن استيفاء المكونات التسعة الأخرى لمعادلة المجال.

كانت الأوراق الشخصية لأينشتاين وحقوق بعض أوراقه المنشورة مقيدة في معرقة قانونية لعدة عقود. أنتجت النسخة الروسية من أعماله المجمعة ونشرت في وقت لم يلتزم فيه الاتحاد السوفيتي بالاتفاقية الدولية لحقوق الطبع والنشر. الآن تنشر النسخة الإنجليزية الأكثر اكتمالاً، بشكل تدريجي للغاية؛ المجلدان الأولان هما ECP-1 و ECP-2.

الفصل الثالث

أينشتاين (1939).

ميشيل (1784). لمناقشة هذا العمل، انظر جيبونز (1979)، شيفر (1979)، إسرائيل (1987)، آيزنشتات (1991).

لابلاس (1796، 1799). للمناقشات حول منشورات لابلاس حول النجوم المظلمة، انظر إسرائيل (1987) وآيزنشتات (1991). يناقش آيزنشتات المحاولات والفشل في التحقق، من خلال الملاحظات الرصدية، من تنبؤ ميشيل بأن الضوء المنبعث من النجوم الضخمة يتأثر بجاذبيتها، وهي المساهمة (عن هذا الفشل) التي قد تكون سبباً في حذف لابلاس للنجوم المظلمة من الطبعة الثالثة من كتابه.

سفارتشيلد (1916، A).

برولت (1962). للحصول على مناقشة تفصيلية لاختبارات قوانين النسبية العامة للجاذبية لأينشتاين، انظر ويل (1986).

للحصول على مناقشة تفصيلية للتاريخ المبكر لرد فعل الناس على هندسة سفارتشيلد والبحث عنها، انظر آيزنشتات (1982). يمكن العثور على تاريخ أوسع يغطي الفترة من 1916 إلى 1974 في إسرائيل (1987). أينشتاين (1939).

سفارتشيلد (1916، B).

إسرائيل (1990).

إسرائيل (1990).

الفصل الرابع

تعليق عام حول الفصل الرابع: الجوانب التاريخية لهذا الفصل تعتمد إلى حد كبير على:

(1) المحادثات الشخصية مع تشاندراسخار على مدى الخمسة والعشرين عامًا الماضية.

(2) مقابلة مسجلة معه.

(3) كتاب عن إدينجتون له (تشاندراسخار، 1983 A).

(4) سيرة ذاتية جميلة عنه (والي، 1991). ولا أذكر مصادر محددة لعناصر معينة إلا في حالات خاصة. جمعت منشورات تشاندراسخار العلمية حول الأقزام البيضاء معًا في تشاندراسخار (1989).

فاولر (1926).

إدينجتون (1926).

الحاشية السفلية 2: للحصول على مناقشة تفصيلية للصعوبات التي واجهها آدامز والأخطاء التي ارتكبها في قياساته، انظر جرينشتاين وأوكي وشييمان (1985). يوفر هذا المرجع أيضًا معلومات حول الدراسات الرصدية للشعري اليمانية ب حتى عام 1985.

هنا حصلت على الحقوق الأدبية بطريقتين. أولاً، حسب فاولر (1926) بالفعل مقاومة الضغط، لذلك كان تشاندراسخار يفحص حسابات فاولر فقط. ثانيًا، ليس هذا هو المسار الذي أجرى تشاندراسخار من خلاله حساباته على الرغم من أنه يعادل رياضياً المسار الحقيقي. هذا الطريق هو الأسهل بالنسبة إليّ في شرحه؛ يستلزم المسار الحقيقي حساب ضغط الإلكترونات باعتباره جزءاً لا يتجزأ من مساحة كمية حركتها.

تشاندراسخار (1931).

الحاشية السفلية 4: ستونر (1930). هذه المساهمة التي قدمها ستونر ذكرها تشاندراسخار بإيجاز (1931). لمناقشة عمل ستونر والأعمال ذات الصلة التي كتبها فيلهلم أندرسون، انظر إسرائيل (1987).

أندرسون (1929)، ستونر (1930).

الشكل 4.3: نشرت كتل ومحيطات الأقزام البيضاء كما هو موضح في هذا الشكل، ونتائج تشاندراسخار للهياكل الداخلية للنجوم القزمة البيضاء، لاحقاً في تشاندراسخار (1935).

إدينجتون (1935 A). لمزيد من التفاصيل حول حجج إدينجتون الخادعة، انظر إدينجتون (1935 b).

والي (1991).

والي (1991).

لقد قيل لي هذا بطريقة موثوقة من قبل أستاذ علم الفلك البارز في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا عندما كنت طالبًا جامعيًا في الفترة 1958-1962. إن انطباعي الشخصي القوي عن تلك الحقبة هو أن معظم علماء الفلك كانوا يتبنون هذا الرأي وقد فعلوا ذلك منذ أوائل الأربعينيات، لكن لا يمكنني التأكد من ذلك.

نقلًا عن والي (1991).

هذا التفسير لسلوك إدينجتون اقترحه عليّ فيرنر إسرائيل، في نقد لنسخة مبكرة من هذا الفصل؛ وأعتقد أنه يتوافق بشكل جيد مع السجل التاريخي.

الفصل الخامس

تعليق عام حول الفصل الخامس:

الجوانب التاريخية لهذا الفصل تعتمد في جزء كبير منها على:

(i) المقابلات التي أجريتها مع المشاركين في الأحداث الموصوفة، أو مع زملائهم وأصدقائهم العلماء.

(ii) قراءتي للأوراق العلمية التي كتبها المشاركون. تحصلت على خلفية عامة عن تاريخ الفيزياء في عشرينيات وثلاثينيات القرن العشرين، كيفلز (1971)، وتحصلت على معلومات أساسية عن تاريخ الفيزياء السوفييتية، ميدفيديف (1978). وتحصلت على معلومات وخلفية مفيدة عن لاندوا من ليفانوف (1980) وجاموف (1970)، وتحصلت على معلومات عن أوبنهايمر من رابي وآخرين (1969)، وسميث ووينر (1980)، وتحصلت على تطور أفكار ويلر من دفاتر ملاحظاته البحثية، ويلر (1988). لقد اعتمدت في بعض الأجزاء على مصادر أخرى مذكورة أدناه. مقابلة مع فاو لير.

مقابلة مع جرينشتاين، وجرينشتاين (1982).

زفيكي (1935).

مقابلة مع جرينشتاين.

بادي (1952).

هذه هي أرقام بادي وزفيكي، كما تظهر في ملخص الحديث الذي تكرر في الشكل 5.2 (بادي وزفيكي، 1934a)، باستثناء «10000 وربما 10 ملايين» التي ظهرت من بحثهما الأكثر تفصيلًا

حول هذه القضية (بادي وزفيكي، 1934a) نتج خطأهما عن افتراض أن المستعر الأعظم الأكبر سطوعًا، يكون محيط غازه الساخن المشع في حدود 1 إلى 100 محيط شمسي. في الواقع، المحيط أكبر بكثير من ذلك، وعندما يتتبع المرء حجتهما، سيجدها تشير إلى كمية أقل بكثير من الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية.

في هذا القسم وخلال الفصل الخامس، أعزو إلى زفيكي مفهوم النجم النيوتروني وتبعاته على المستعرات العظمى والأشعة الكونية، على الرغم من أن نشر الأفكار كان مشتركًا مع بادي. إن منح الفضل لزفيكي في هذه الأفكار (والفضل لبادي في الفهم الأساسي لبيانات الرصد) هو تخمينات مستنيرة مبنية على مناقشات مع زملائهم العلماء، مقابلات مع جرينشتاين وفاولر وإيجن وسانداج.

الشكل 5.2: بادي وزفيكي (1934a). للحصول على بعض التبرير للأرقام الموجودة في الملخص، راجع العرض المفصل في (بادي وزفيكي، 1934b).

لقد قدم لي صديقه المقرب هذا التفسير لورقة لاندوا المنشورة، يفجيني ميخائيلوفيتش ليفشيتز، مقابلة مع ليفشيتز.

مقتبس من ليفانوف (1980).

مقتبس من ليفانوف (1980).

جاموف (1970).

الإحصائيات المتعلقة بالسجن والوفيات في عهد ستالين غير مؤكدة إلى حد ما. يقدم ميدفيدف (1978) ما قد يكون أكثر الأرقام المتاحة موثوقة في السبعينيات. ومع ذلك، في أواخر الثمانينيات، أتاح الجلاسنوست النشر العام للمعلومات مما أدى إلى ارتفاع الأرقام. الأرقام التي أقتبسها هي تقييم شامل أجراه أصدقاؤني الروس الذين درسوا القضية بشيء من العمق في ضوء الكشف عن الجرة. الفصل الحادي عشر من إدينجتون (1926) والمراجع الملحقة به.

لاندوا (1932).

نُشرت مخطوطة لاندوا في لاندوا (1938). كان صديقه المقرب جورج جاموف قد نشر بالفعل نفس الفكرة من دون علم لاندوا (جاموف، 1937). كان جاموف قد هرب من الاتحاد السوفيتي عام 1933، بعد وقت قصير من سقوط ستالين الحديدي (انظر جاموف 1970)، ولكن قبل هروبه درس فكرة لاندوا الأصلية عما قبل النيوترون والتي تتمثل في إبقاء النجم ساخنًا عن طريق قلب مركزي كثيف. بعد اكتشاف النيوترون، أصبح من الطبيعي أن يعيد جاموف ولاندوا (إنهما الآن منقطعان عن الاتصال ببعضهما) تفسير قلب لاندوا عام 1931 بشكل مستقل على أنه قلب نيوتروني.

لفت صديق لاندوا الشخصي المقرب -يفجيني ميخائيلوفيتش ليفشيتز- انتباهي إلى هذه المراسلات في عام 1982 (مقابلة ليفشيتز) وأوضح لي الحكاية التي خلفها، كما رويت هنا. بعد وفاة ليفشيتز، نشر خالانتيكوف (1988) المراسلات الكاملة -بما في ذلك تلك التي بين كابيتسا

ومولوتوف، وكابيتسا وستالين، وكابيتسا وبيريا، والتي أدت في النهاية إلى إطلاق سراح لاندאו من السجن. المقتطفات المقتبسة هنا من ترجمتي الخاصة عن اللغة الروسية.

جوريليك (1991).

انظر الملاحظة في الصفحات...

مقتبس في رويال (1969).

سيربر (1969).

يُعتقد أن هذه النجوم العملاقة تنشأ في أنظمة نجمية ثنائية عندما يتفجر أحد النجوم داخلياً ليصبح نجماً نيوترونياً، وبعد ذلك بوقت طويل، يبتلع في هيئة دوامة قلب نجمه المرافق ليستقر فيه. أصبحت هذه الوحوش الغريبة تسمى «جسم ثورن-زيتكوف»، لأنني وأنا زيتكوف كنا أول من حسب بنيتها بالتفصيل. انظر ثورن وزيتكوف (1977)؛ أيضاً كانون وآخرون. (1992) أوبنهايمر وسيربر (1938).

شايبرو وتيوكولسكي (1983)، هارتل وساباديني (1977).

المربع 5.4: في هذا المربع، معظم وصفي لتسلسل الخطوات التي أجري البحث من خلالها هو تكهنات مستتيرة، بناءً على مقابلة مع فولكوف (مقابلة فولكوف)، وأرشيفات تولمان (تولمان، 1948)، والكتاب المشاركون (أوبنهايمر وفولكوف، 1939؛ تولمان، 1939).

أرشفة المراسلات بين تولمان وأوبنهايمر في تولمان. (1948) مقابلة فولكوف.

ولقد نشر هذا الاستنتاج في أوبنهايمر وفولكوف (1939). نُشرت تحليلات تولمان ذات الطبيعة التحليلية - التي اعتمد عليها أوبنهايمر وفولكوف في تقديرهما لتأثير القوى النووية - في تولمان (1939).

المجلد الرابع، الصفحات 33-40 من ويلر (1988).

للحصول على تفاصيل حول خلفية ويلر وأعماله السابقة، انظر ويلر (1979) وثورن وزوريك (1986).

الإطار 5.5: نُشرت معادلة الحالة (ثمرة عمل هاريسون وويلر) في هاريسون، وواكانو، وويلر (1958)، وبفواصل أكثر في هاريسون، وثورن، وواكانو، وويلر (1965). يعد المنحنى بالخط الثخين الأحدث عند الكثافات النووية وما فوقها (1014 جرام لكل سنتيمتر مكعب) بمثابة تقريب لمختلف معادلات الحالة الحديثة كما استعرضها شايبرو وتيوكولسكي (1983).

الشكل 5.5: من هاريسون وواكانو وويلر (1958) وهاريسون وثورن وواكانو وويلر (1965). يعد منحنى النجم النيوتروني الصلب بمثابة تقريب لمختلف الحسابات الحديثة كما استعرضها

شابيرو و تيو كولسكي (1983).

أوبنهايمر وفولكوف (1939).

زفيكي (1939).

رايبي والكتاب المشاركون (1969).

الفصل السادس

تعليق عام حول الفصل السادس: الجوانب التاريخية لهذا الفصل مبنية إلى حد كبير على ما يلي:

(i) مقابلاتي مع المشاركين في الأحداث الموصوفة، أو مع زملائهم وأصدقائهم العلماء.

(ii) مشاركتي الخاصة في جزء صغير من تاريخ الأحداث.

(iii) قراءتي للأوراق العلمية التي كتبها المشاركون.

(iv) وصف مشاريع الأسلحة النووية الأمريكية في بيت (1982)، ورودس (1986)، وتيلر (1955)، ويورك (1976).

(v) أوصاف مشاريع الأسلحة النووية السوفيتية وغيرها من الأحداث في اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية في جولوفين (1973)، ميدفيديف (1978)، ريتوس (1990)، رومانوف (1990)، سخاروف (1990).

(vi) دفاتر ملاحظات جون ويلر البحثية (ويلر، 1988).

نشرت نسخة مكتوبة من محاضرة ويلر وتبادل التعليقات بين ويلر وأوبنهايمر في سولفاي (1958).

أعدت صياغة هذا الاقتباس من هاريسون وواكانو وويلر (1958)، مع تغييرات طفيفة في التفاصيل لتناسب عبارات هذا الكتاب واصطلاحاته.

مقابلة مع سيربر.

مقابلة مع فاوولر.

مقابلة مع سيربر.

أنا هنا أتكهن. لا أعرف على وجه اليقين أنه أجرى مثل هذا البحث السريع، ولكن بناءً على فهمي لأوبنهايمر ومحتويات الورقة التي كتبها عندما انتهى البحث (أوبنهايمر وسنايدر، 1939)، أشك بشدة في أنه فعل ذلك.

نشر أوبنهايمر وسنايدر نتائج أبحاثهما في أوبنهايمر وسنايدر (1939).

مقابلة مع فاوولر.

مقابلة مع ليفشيتز.

ويلر (1979). هذا المرجع عبارة عن سيرة ذاتية لأبحاث ويلر في الفيزياء النووية.

بور وويلر (1939)، وويلر (1979). لم يذكر بور وويلر اسم البلوتونيوم 239- في ورقتهما البحثية، لكن لويس تيرنر استنتج مباشرة من الشكل 4 أنه نواة مثالية للحفاظ على التفاعلات المتسلسلة، واقترح في مذكرة سرية شهيرة استخدامه كعنصر نووي لوقود القنبلة الذرية (ويلر، 1985).

مقابلة مع زيلدوفيتش وخاريتون (1939).

لمزيد من التفاصيل حول دور ويلر الرئيسي، انظر الصفحات 2-5 من كتاب كلودر (1972). من خطاب ألقاه أوبنهايمر في لوس ألاموس، نيو مكسيكو، في ١٦ أكتوبر ١٩٤٥؛ انظر الصفحة 172 من جودتسايلد (1980).

صفحة 174 من جودتسايلد (1980).

ويلر (1979).

هذه التفاصيل كشفها خاريتون في محاضرة ألقاها في موسكو، ونشرتها صحيفة نيويورك تايمز يوم الخميس 14 كانون الثاني (يناير) 1993، الصفحة A5. مينديفيد (1979).

تقرير بتاريخ 30 أكتوبر 1949 من اللجنة الاستشارية العامة إلى هيئة الطاقة الذرية الأمريكية. مستنسخة في ملحق يورك (1976).

بيت (1982).

مقابلة مع ويلر.

مقابلة مع ويلر.

USAEC (1984)، صفحة 251.

مقابلة مع ويلر.

يبدو أن هناك بعض الالتباس حول التاريخ الذي بدأ فيه العمل في تصميم القنبلة الهيدروجينية السوفيتية. يؤرخه ساخاروف (1990) بأنه ربيع عام 1948، لكن جينزبرج (1990) يؤرخه بأنه عام 1947.

هذا هو التاريخ الذي قدمه ساخاروف (1990)؛ يحدد جينزبرج (1990) التاريخ في عام 1947. الحاشية السفلية 3: وضحت تكهنات ساخاروف في ساخاروف (1990). ثبتت شفهيًا تأكيدات زيلدوفيتش لأصدقائه الروس المقربين، والذين نقلوه إليّ بدورهم.

نقله إليّ فيتالي جينزبرج، الذي كان حاضرًا، وكذلك ساخاروف. وفي النسخة الإنجليزية من

مذكراته (ساخاروف، 1990)، قدم التعبير عن هذا النقل على النحو التالي: «مهمتنا هي تقبيل مؤخرة زيلدوفيش». للاطلاع على بعض آرائي الخاصة حول العلاقة المعقدة بين زيلدوفيش وساخاروف، انظر ثورن (1991).

اقتباس لاندوا هذا نقله إليّ بشكل مستقل العديد من علماء الفيزياء النظرية السوفييت.
رومانوف (1990).

الأرقام التي أستشهد بها لإطلاق الطاقة في انفجارات القنابل المختلفة مأخوذة من يورك (1976).

ساخاروف (1990).

رومانوف (1990)، ساك هاروف (1990). رومانوف -في مقال تكريماً لساخاروف- يعزو الاكتشاف إلى ساخاروف وزيلدوفيش بشكل مشترك. يقول ساخاروف إن «العديد منا في الأقسام النظرية توصلوا إلى [هذه الفكرة] في نفس الوقت تقريباً»، ثم يترك انطباعاً بأنه هو نفسه يستحق النصيب الأكبر من الفضل، لكنه يقول لا شك في أن زيلدوفيش ويوري تروتنيف وآخرين قدموا مساهمات كبيرة.

USAEC (1954).

ويلر، محادثة هاتفية مع ثورن، يوليو 1991.

ساخاروف (1990).

لقد وصف الدافع لهذا البحث، وهو السعي لفهم المستعرات العظمى وأدوارها كمصادر للأشعة الكونية، في كولجيت وجونسون (1960). أجرى كولجيت ووايت (1963، 1966) عمليات محاكاة لتشكيل المستعرات العظمى ذات الكتلة الصغيرة، باستخدام وصف نيوتن للجاذبية بدلاً من وصف أينشتاين. أجرى ماي ووايت (1965، 1966) عمليات محاكاة لتشكيل الثقوب السوداء ذات الكتلة الكبيرة، باستخدام وصف النسبية العامة لأينشتاين للجاذبية.

مشينيك ونادييجين (1964)، بودوريتس (1964).

مقابلة مع ليفشيتز.

فنكلشتاين (1958).

الحاشية 5: انظر على سبيل المثال المناقشات الواردة في الإطار 31.1 والفصل 31 من MTW.

للحصول على وصف فنكلشتاين لكيفية حدوث هذا الاكتشاف، انظر فنكلشتاين (1993).

ثورن (1967).

هاريسون، ثورن، واكانو، ويلر (1965).

ويلر (1968).

الفصل السابع

تعليق عام حول الفصل السابع، الجوانب التاريخية لهذا الفصل مبنية على:

- (i) تجربتي الشخصية كمشارك.
- (ii) مقابلاتي مع مشاركين آخرين.
- (iii) قراءتي للأوراق العلمية التي كتبها المشاركون.

ويلر (1964 b).

لقد نشرت لأول مرة مفهوم حدسية الطوق في دورية الكتاب التكريمي Festschrift تكريمًا لويلر (ثورن، 1972)، وفي الإطار 32.3 من MTW.

وقد أطلق نوفيكونوف وزيلدوفيش على هذه الفكرة اسم الكون شبه المغلق. وفي النهاية نشرنا ورقتين منفصلتين تصفان الأمر: زيلدوفيش (1962) ونوفيكونوف (1963).

مقابلة مع نوفيكونوف.

مقابلة مع نوفيكونوف.

نُشرت الأفكار الرئيسية والحسابات الأولية لهذا البحث في جينزبرج (1964)؛ وُضعت تفاصيل رياضية أكثر اكتمالاً بواسطة جينزبرج وزميله الشاب ليونيد مويسيفيتش أوزيرنوي (جينزبرج وأوزيرنوي، 1964).

وقد نشرنا تحليلاتهم واستنتاجاتهم في دوروشكيفيتش، وزيلدوفيش، ونوفيكونوف (1965).
(ترتيب المؤلفين أبجدي في اللغة الروسية).

يمكن للقراء رؤية نكهة محاضرة نوفيكونوف في المقالات المراجعة المؤثرة التي كتبها هو وزيلدوفيش قبل وقت قصير من المؤتمر: زيلدوفيش ونوفيكونوف (1964، 1965).

دوروشكيفيتش وزيلدوفيش ونوفيكونوف (1965)؛ انظر الملاحظة في الصفحة 275.
نُشر تحليل إسرائيل في إسرائيل (1967).

نوفيكونوف (1969)، دي لا كروز، تشاس، إسرائيل (1970)، بريس (1972).
دي لا كروز، تشاس، إسرائيل (1970).

للحصول على مناقشة أكثر تفصيلاً واکتمالاً حول تفاعل المجالات المغناطيسية مع الثقب الأسود، انظر الأشكال 10 و 11 و 36 من ثورن وماكدونالد وبريس (1986).

للحصول على مراجعة ومراجع، انظر القسم 6.7 من كارتير (1979)؛ نُشرت المرحلة النهائية

اللاحقة في مازار (1982) وبونتينج (1983).

جريفز وبريل (1960) والمراجع فيه.

كير (1963).

كارتر (1966)، بوير وليندكويس (1967).

كارتر (1979) والمراجع السابقة فيه.

كارتر (1968).

إسرائيل (1986).

بنروز (1969).

نيومان وآخرون (1965).

بريس (1971).

تيو كولسكي (1972).

مقابلة مع تيو كولسكي.

الصحافة وتيو كولسكي (1973).

تشاندراسخار (b 1983).

الفصل الثامن

تعليق عام حول الفصل الثامن: الجوانب التاريخية لهذا الفصل مبنية على:

(i) تجربتي الشخصية كمشارك.

(ii) مقابلاتي مع مشاركين آخرين.

(iii) قراءتي للأوراق العلمية التي كتبها المشاركون.

(iv) الروايات المنشورة التالية عن التاريخ: فريدمان (1972)، جياكوني وجورسكي (1974)،

هيرش (1979) أوهورو (1981).

ويلر (a 1964).

وبعد مرور اثنين وعشرين عامًا، في عام 1986، أعرب لي زيلدوفيش عن أسفه لأنه لم يكن أكثر انفتاحًا بشأن مسألة ما يحدث داخل الثقوب السوداء؛ مقابلة مع زيلدوفيش.

زيلدوفيش وجوسينوف (1965).

تريمبل وثورن (1969).

سالبتر (1964)، زيلدوفيش (1964) .

نوفيكوف وزيلدوفيش (1966) .

فريدمان (1972) .

جياكوني، جورسكي، باوليني، وروسي (1962) .

سونيايف (1972) .

الفصل التاسع

تعليق عام حول الفصل التاسع، الجوانب التاريخية لهذا الفصل مبنية على:

(i) تجربتي الشخصية كمشارك هامشي منذ عام 1962 فصاعدًا.

(ii) المقابلات التي أجريتها مع العديد من المشاركين.

(iii) قراءتي للأوراق العلمية التي كتبها المشاركون.

(iv) الروايات التاريخية المنشورة وغير المنشورة التالية: هاي (1973)، جرينشتاين (1982)،

كيليرمان وشيتس (1983)، شتروف وزيرجس (1962)، سوليفان (1982، 1984).

يانسكي (1932).

ويل وجرينشتاين (1937).

مقابلة مع جرينشتاين.

للحصول على وصف رير التاريخي لعمله، انظر رير (1958).

رير (1940).

مقابلة مع جرينشتاين.

مقابلة مع جرينشتاين.

بولتون، ستانلي، وسلي (1949).

بادي ومينكوفسكي (1954).

جينيسون وداس جوبتا (1953).

نُشرت وقائع هذا المؤتمر في واشنطن (1954).

شميدت (1963).

جرينشتاين (1963).

سميث (1965).

ألفين هيرلوفسون (1950)، كينهيور (1950)، جينزبرج (1951). لمناقشة تاريخ هذا العمل
 انظر جينزبرج (1984).
 بوريدج (1959).
 نشرت وقائع هذا المؤتمر في روبنسون وشيلد وشوكينج (1965).
 هذا الوصف مأخوذ من ذاكرتي الحية للمؤتمر.
 ريس (1971).
 لونجير، رايل، شوير (1973).
 سالبير (1964)، زيلدوفيش (1964).
 ليندن بيل (1969).
 باردين وبيرسون (1975).
 باردين (1970).
 بلاندفورد وريس (1974).
 ليندن بيل (1978).
 بلاندفورد (1976).
 بلاندفورد وزناجيك (1977).
 لمزيد من المناقشات التفصيلية حول الوضع الحالي لفهمنا للنجوم الزائفة، والمجرات الراديوية،
 والتدفقات النفاثة، وأدوار الثقوب السوداء وأقراصها المتنامية كمحركات مركزية تمددها بالطاقة،
 انظر، على سبيل المثال، بيغلان وبلاندفورد وريس (1984) وبلاندفورد (1987).
 انظر على سبيل المثال، فيني (1989).

الفصل العاشر

تعليق عام حول الفصل العاشر، الجوانب التاريخية لهذا الفصل مبنية على:

- (i) تجربتي الشخصية كمشارك.
- (ii) مقابلاتي مع العديد من المشاركين.
- (iii) قراءتي للأوراق العلمية التي كتبها المشاركون. لمزيد من النظرات العامة العلمية حول إشعاع الجاذبية والجهود المبذولة للكشف عنه، انظر على سبيل المثال بليز (1991) وثورن (1987).

ويبر (1953).

نُشرت ثمار عمل فيبر في مجلة فيبر (1960، 1961).

رسالة من فيبر إلى بتاريخ 1 أكتوبر 1992؛ ولم ينشر فيبر هذه الحجة في ذلك الوقت. كان فريمان دايسون، زميل فيبر، أول من أظهر أن الطبيعة من المحتمل أن تنتج رشقات من موجات الجاذبية بالقرب من الترددات التي اختارها فيبر (دايسون، 1963).

أعلن فيبر عن الأدلة الرصدية لموجات الجاذبية في فيبر (1969). وثق النشاط التجريبي الذي تلا ذلك والجدل حول ما إذا كان قد حدث بالفعل اكتشاف الموجات، على سبيل المثال، في ديساباتا وفيبر (1977) والأبحاث المذكورة فيه. للاطلاع على دراسة سوسولوجية للجدل، انظر كولينز (1975، 1981).

نُشرت المحاضرات التي أُلقيت في المدرسة الصيفية، بما في ذلك محاضرات فيبر، في مجلة DeWitt and DeWitt (1964).

نُشرت هذه النسخة الأولى من تحذير براجينسكي في براجينسكي (1967).

نُشرت التحذيرات الموضحة في براجينسكي (1977) وجيفراد (1976)، وشرح أصل مبدأ عدم التأكد للحد في ثورن ودريفير وكافيز وزيميرمان وساندرج (1978).

انظر، على سبيل المثال، شبيه للنص لمناقشة مؤتمر عام 1978 في إيسيتين وكلارك (1979).

براجينسكي، وفورونتسوف، وخليلي (1978)؛ ثورن، ودريفير، والكهوف، وزيميرمان، وساندرج (1978).

مايكلسون وتاير (1984).

جيرتسنشتاين وبوستوفويت (1962)، فيبر (1964)، فايس (1972)، وموس، وميلر، وفوروارد (1971).

انظر على سبيل المثال دريفير (1991) والمراجع فيه.

انظر براجينسكي وخليلي (1992).

للحصول على نظرة عامة على خطط LIGO، راجع أبراموفيتشي والكتاب المشاركون (1992).

الفصل الحادي عشر

تعليق عام حول الفصل الحادي عشر: الجوانب التاريخية (البسيطة إلى حد ما) لهذا الفصل مبنية على:

(1) تجربتي الشخصية كمشارك.

(2) مقابلاتي مع اثنين من المشاركين الآخرين.

(3) قراءتي للأوراق العلمية التي كتبها المشاركون.

(4) تجربتي كطالب في دورة تدريبية حول النماذج والثورات العلمية التي درسها توماس كون في جامعة برينستون عام 1965.
كون (1962).

وصف ريتشارد فاينمان، أحد أعظم علماء الفيزياء في قرننا هذا، بشكل جميل، قوة وجود العديد من النماذج المختلفة في تناول المرء في كتابه الصغير الجميل «شخصية القانون الفيزيائي» (فاينمان، 1965). مع ذلك، لاحظ أنه لم يستخدم قَط كلمة «نموذج»، وأظن أنه لم يقرأ كتابات توماس كون قَط. وصف كون كيف يعمل أشخاص مثل فاينمان؛ لقد عمل فاينمان بهذه الطريقة.

ابتكر نموذج الزمكان المسطح بشكل مستقل تقريبًا عدد من الأشخاص المختلفين؛ يُعرف علميًا باسم «نظرية المجال في صياغة الزمكان المسطح للنسبية العامة». للحصول على لمحة عامة عن تاريخها ومفاهيمها، راجع المقاطع التالية في MTW: الأقسام 7.1 و 18.1؛ الأطر 7.1 و 17.2 و 18.1؛ التمرين 7.3. للحصول على تعميم أُنِيق لها، والذي يوضح علاقتها بنموذج الزمكان المنحني، انظر جريشوك وبيتروف وبوبوفا (1984).

كوهين ووالد (1971)، هاني وروفيني (1973).

بلاندفورد وزناجيك (1977).

زناجيك (1978)، الدامور (1978).

ثورن، وبريس، وماكدونالد (1986). انظر أيضًا بريس وثورن (1988).

الفصل الثاني عشر

تعليق عام حول الفصل الثاني عشر، الجوانب التاريخية لهذا الفصل مبنية على:

(1) تجربتي الشخصية كمشارك.

(2) مقابلاتي مع مشاركين آخرين.

(3) قراءتي للأوراق العلمية التي كتبها المشاركون.

(4) الحسابات المنشورة التالية عن التاريخ: بيكنشتاين (1980)، هوكينج (1988)، إسرائيل (1987).

هذا والوصف اللاحق لكيفية وصول هوكينج إلى الفكرة يأتي من مقابلة مع هوكينج وهو كينج

- (1988). نشر هوكينج تفاصيل وعواقب فكرته، كما هو موضح في القسم الأول من هذا الفصل، «نمو الثقوب السوداء»، في كتاب هوكينج (1973، 1972، 1971b).
- بنروز (1965).
- الإطار 12.1: هوكينج (1972، 1973).
- مقابلة مع إسرائيل، مقابلة مع بنروز، مقابلة مع هوكينج.
- بنروز (1965).
- الإطار 12.2: هوكينج (1972، 1973).
- هوكينج ورايرتل (1972).
- كريستودولو (1970).
- يصف بيكنشتاين هذا الأمر والجدل الذي أعقبه مع هوكينج في بيكنشتاين (1980). نشر بيكنشتاين تخمينه الخاص بأنثروبيا الثقب الأسود وحججه المؤيدة له في بيكنشتاين (1972، 1973).
- نُشرت وقائع المدرسة الصيفية لعام 1972 في مجلة (DeWitt and DeWitt 1973).
- باردين، وكارتر، وهوكينج (1973).
- رافقني تشارلز ميسنر وجون ويلر في زيارتي لموسكو في يونيو 1971، لكنهما لم يكونا معي في شقة زيلدوفيش في أثناء المناقشة الموصوفة في الفقرات التالية.
- لقد أعدت بناء المحادثة التالية من الذاكرة، وترجمتها إلى لغة أقل علمية مما استخدمناه بالفعل.
- زيلدوفيش (1971).
- زيلدوفيش وستاروينسكي (1971).
- ويصف هوكينج، في هوكينج (1988)، كيف وصل إلى اكتشافه «الفارق» بأن جميع الثقوب السوداء تشع. وقد نُشر هذا الاكتشاف وآثاره في هوكينج (1974، 1975، 1976).
- انظر على سبيل المثال والد (1977).
- الحاشية السفلية 11: والد (1977).
- هوكينج (1988).
- الفصل الثامن من كتاب ثورن وبريس وماكدونالد (1986) والمراجع فيه.
- الإطار 12.5: ديفيز (1975)، أونروه (1976)، أونروه والوالد (1982، 1984).
- جيبونز وهوكينج (1977).
- الصفحة (1976).

على سبيل المثال، هو كينج (1971a)؛ نوفيكونف، وبولناريف، وستاروبينسكي، وزيلدوفيش (1979).

بايج وهو كينج (1975)؛ نوفيكونف، وبولناريف، وستاروبينسكي، وزيلدوفيش (1979).

الفصل الثالث عشر

تعليق عام حول الفصل الثالث عشر، الجوانب التاريخية لهذا الفصل مبنية على:

(1) تجربتي الشخصية (على الرغم من كوني مراقبًا لا مشاركًا).

(2) مقابلاتي مع المشاركين.

(3) قراءتي للأوراق العلمية التي كتبها المشاركون.

هاريسون، واكانو، ويلر (1958)؛ ويلر (1960).

ويلر (1964a,b)؛ هاريسون، ثورن، واكانو، ويلر (1965).

أوبنهايمر وسنايدر (1939).

راجع الصفحات الأخيرة من الفصل الخامس.

المفردة كما وصفت هنا هو أنه في الفراغ خارج النجم المتفجر، وبما أن منطقة الفراغ موصوفة بحل شفارتزشيلد لمعادلات أينشتاين، غالبًا ما يشار إلى هذه المفردة باسم متفرد هندسة شفارتزشيلد. وتحل كميًا، على سبيل المثال، في الفصل 32 من MTW.

الشكل 13.1: المرجع نفسه.

ويلر (1960، 1964a,b)؛ هاريسون، ثورن، واكانو، ويلر (1965).

نُشرت وجهة النظر هذه والحسابات التي قادت خلااتنيكونف وليفشيتز إليها في ليفشيتز وخالاتنيكونف (1960، 1963) وفي لاندوا وليفشيتز (1962).

المرجع نفسه.

لاندوا وليفشيتز (1962).

الشكل 13.4: كان واضحًا في أوائل الستينيات للطلاب في مجموعة ويلر، حيث أُجري بحث جريفيز-بريل (1960)، أنه لا بد من وجود حل لمعادلات أينشتاين من النوع الموضح هنا. ومع ذلك، فإنني أستنتج من مناقشة مع بنروز أن الباحثين في معظم المجموعات الأخرى لم يدركوا ذلك حتى أواخر الستينيات. وكان من الصعب بناء مثل هذه الحلول بشكل صريح، ونحن في مجموعة ويلر لم نحاول، ولم ننشر أي شيء حول هذه المشكلة. أول نشر للفكرة وأول محاولة لحل واضح، على حد علمي، كانت من قبل نوفيكونف (1966).

جريفز وبريل (1960) والمراجع فيه.

تأتي مناقشة السيرة الذاتية لبنروز إلى حد كبير من مقابلة مع سياما، ومقابلة مع بنروز.
المرجع نفسه.

مقابلة مع بنروز. بنروز (1989).

بنروز (1989).

بنروز (1965).

دونت الأساليب العالمية في كتاب كلاسيكي من تأليف هوكينج وإليس (1973).
هوكينج وبنروز (1970).

من مناقشاتي الخاصة مع ليفشيتز في السبعينيات.

رسالة من خالانتنيكوف إليّ، في 18 يونيو 1990.

من ذاكرتي الخاصة للاجتماع وتدايعاته.

خالانتنيكوف وليفشيتز (1970). انظر أيضًا بيلينسكي، وخالانتنيكوف، وليفشيتز (1970)،
(1982).

المرجع نفسه.

مقابلة مع ليفشيتز، ليفانوف (1980).

لقد تعلمت هذا من بنروز.

ألكساندروف (1955، 1959).

بيمينوف (1968).

ليفشيتز وخالانتنيكوف (1960، 1963).

على سبيل المثال، نوفيكونوف (1966).

في اللغة العلمية، فإن أفق كوشي الداخلي لحل رايسنر-نوردستروم هو غير مستقر. الحدسية
موجودة في بنروز (1968)؛ البراهين موجودة في تشاندراسخار وهارتل (1982) والمراجع السابقة
المذكورة فيه.

بيلينسكي، وخالانتنيكوف، وليفشيتز (1970، 1982).

ميسنر (1969).

استنتج ويلر هذا لأول مرة (1960)، بناءً على أفكاره السابقة حول تقلبات الفراغ في هندسة
الزمكان (ويلر، 1955، 1957).

الحاشية السفلية 2: قدم زمن بلانك-ويلر واستنتج ويلر (1955، 1957) أهميته الفيزيائية.

اقترح هذا لأول مرة ويلر (1960)، وأصبح كمياً أكثر منذ ذلك الحين من خلال ما يسمى الآن «معادلة ويلر-ديويت». انظر على سبيل المثال المناقشة في هوكينج (1987).
ويلر (1957، 1960).

انظر على سبيل المثال هوكينج (1987، 1988).

أظهر دوروشكيفيتش ونوفيكوف (1978) أن المفردة تتقدم؛ استنتج بواسون وإسرائيل (1990) وأوري (1991) تفاصيل التقدم في نماذج مثالية؛ وقد أظهر أوري (1992) مبدئياً أن هذه النماذج تمثل أدلة جيدة لسلوك المفردات في الثقوب السوداء الحقيقية.

للحصول على تفاصيل حول هذه المحاكاة، انظر شابيرو وتيوكولسكي (1991).

للحصول على تفاصيل حول هذه المحاكاة، انظر شابيرو وتيوكولسكي (1991).

نشرت أدلة هوكينج في هوكينج (1992 a).

الفصل الرابع عشر

تعليق عام حول الفصل الرابع عشر، الجوانب التاريخية لهذا الفصل تعتمد بالكامل تقريباً على تجربتي الخاصة كمشارك.

اكتشف لودفيج فلام (1916) أنه مع الاختيار المناسب للطوبولوجيا، فإن حل سفارتسكيلد (1916a) لمعادلة أينشتاين يصف ثقباً دودياً كروياً فارغاً.

الشكل 14.2: كروسكال (1960).

موريس وثورن (1988).

هوكينج وإليس (1973).

لم يستنتج هوكينج هذا إلا بشكل غير مباشر ومبدئي إلى حد ما من اكتشافه لتبخر الثقب الأسود. وقد ثبت ذلك بقوة بعد ست سنوات، من خلال كانديلاس (1980).

انظر والد ويورتسيفير (1991) والمراجع الأخرى المذكورة فيه.

ويلر (1955، 1957، 1960).

جيروش (1967). لقد أعطى فريدمان، وباباستاماتيوس، وباركر، وتشانج (1988) مثلاً واضحاً على إنشاء ثقب دودي من النوع الذي تصورته نظرية جيروش.

الحاشية 8: فان ستوكوم (1937)، جودل (1949)، تيبيلر (1976).

موريس، وثورن، ويورتسيفير (1988).

موريس، وثورن، ويورتسيفير (1988).

الحاشية السفلية 12: فريدمان وموريس (1991).

إيشيفيريا، وكليנקهامر، وثورن (1991).

المربع 14.2: إيشيفيريا وكليנקهامر وثورن (1991).

فوروارد (1992).

لإجراء مناقشة فنية متأنية وشاملة إلى حد ما لمسألة المفارقات عندما يكون لدى المرء آلة زمنية
تعتمد على الثقب الدودي، راجع فريدمان والكتاب المشاركون (1990).

هول (1989).

هيسكوك وكونكوفسكي (1982).

فروloff (1991).

كيم وثورن (1991).

هوكينج (1992 b).

الحاشية السفلية 14: جوت (1991).

للحصول على وصف علمي إلى حد ما لأسباب الشكوك التي ذكرتها في عام 1993 بشأن آلات
الزمن، ولمحة مفصلة عن الأبحاث التي أُجريت على آلات الزمن حتى ربيع عام 1993، راجع ثورن
(1993).

فهرس

المقابلات التي أجراها كيب ثورن وسجلها على أشرطة تسجيل لتكون جزءاً من مراجع هذا الكتاب.

بايم، جوردون.

5 سبتمبر 1985، شامبين/ أوربانا، إلينوي.

بيلينسكي، فلاديمير.

27 مارس 1986، موسكو، اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية.

براجينسكي، فلاديمير بوريسوفيتش.

20 ديسمبر 1982، موسكو، اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية؛ 27 مارس

1986، موسكو، اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية.

كارتر، براندون.

6 يوليو 1983، بادوفا، إيطاليا.

تشاندراسخار، سابرامانين.

3 أبريل 1982، شيكاغو، إلينوي.

دامور، تيبو.

26 يوليو 1986، كاريس، كورسيكا.

ديتويلر، ستيفن.

ديسمبر 1980، بالتيمور، ماريلاند.

ديويت، بريس.

ديسمبر 1980، بالتيمور، ماريلاند.

دريفر، رونالد.

21 يونيو 1982، ليه أوش، فرنسا.

إياردلي، دوج.

ديسمبر 1980، بالتيمور، ماريلاند.

إيجن، أولين.

13 سبتمبر 1985، باسادينا، كاليفورنيا.

إليس، جورج.

ديسمبر 1980، بالتيمور، ماريلاند.

فنكلشتاين، ديفيد.

8 يوليو 1983، بادوفا، إيطاليا.

فوروارد، روبرت.

31 أغسطس 1982، أوكسنارد، كاليفورنيا.

فاولر، ويليام.

6 أغسطس 1985، باسادينا، كاليفورنيا.

جيروش، روبرت.

2 أبريل 1982، شيكاغو، إلينوي.

جياكوني، ريكاردو.

29 أبريل 1983، جرينيلت، ماريلاند.

جينزبرج، فيتالي لازاريفيتش.

ديسمبر 1982، موسكو، اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية؛ 3 فبراير 1989،

باسادينا، كاليفورنيا.

جرينشتاين، جيسي.

9 أغسطس 1985، باسادينا، كاليفورنيا.

جريتشوك، ليونيد.

26 مارس 1986، موسكو، اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية

هاريسون، كينت.

- 5 سبتمبر 1985، بروفو، يوتا.
- هارتل، جيمس.
- ديسمبر 1980، بالتيمور، ماريلاند؛ 2 أبريل 1982، شيكاغو، إلينوي.
- هوكينج، ستيفن.
- يوليو 1980، كامبريدج، إنجلترا (غير مسجلة).
- إيسر، جيمس.
- ديسمبر 1980، بالتيمور، ماريلاند.
- إسرائيل، فيرنر.
- يونيو 1982، ليه أوش، فرنسا.
- خالاتنيكوف، إسحاق ماركوفيتش.
- 27 مارس 1986، موسكو، اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية.
- ليفشيتز، يفجيني ميخائيلوفيتش.
- ديسمبر 1982، موسكو، اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية.
- ماك-كالوم، مالكولم.
- 30 أغسطس 1982، سانتا باربرا، كاليفورنيا.
- ميسنر، تشارلز.
- 10 مايو 1981، باسادينا، كاليفورنيا.
- نوفيكوف، إيجور دميترييفيتش.
- ديسمبر 1982، موسكو، اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية؛ 28 مارس 1986، موسكو، اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفيتية.
- بنروز، روجر.
- 7 يوليو 1983، بادوفا، إيطاليا.
- بريس، ويليام.
- ديسمبر 1980، بالتيمور، ماريلاند.

- بريس، ريتشارد.
- ديسمبر 1980، بالتيمور، ماريلاند.
- ريس، مارتن.
- ديسمبر 1980، بالتيمور، ماريلاند.
- سانداج، ألان.
- 13 سبتمبر 1985، بالتيمور، ماريلاند.
- سياما، دينيس.
- 8 يوليو 1983، بادوفا، إيطاليا.
- سيربر، روبرت.
- 5 أغسطس 1985، مدينة نيويورك.
- سمر، لاري.
- ديسمبر 1980، بالتيمور، ماريلاند.
- تيوكولسكي، شاول.
- 27 يناير 1985، إيثاكا، نيويورك.
- أونروه، ويليام.
- ديسمبر 1980، بالتيمور، ماريلاند.
- فان ألين، جيمس.
- 29 أبريل 1973، جرينيلت، ماريلاند.
- فولكوف، جورج.
- 11 سبتمبر 1985، فانكوفر، كولومبيا البريطانية.
- والد، روبرت.
- ديسمبر 1980، بالتيمور، ماريلاند؛ 2 أبريل 1982، شيكاغو، إلينوي.
- ووبر، جوزيف.
- 20 يوليو 1982، كوليدج بارك، ماريلاند.

فايس، راينر.

7 يوليو 1983، بادوفا، إيطاليا.

ويلر، جون.

ديسمبر 1980، بالتيمور، ماريلاند.

زيلدوفيش، ياكوف بوريسوفيتش.

17 ديسمبر 1982، موسكو، اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفياتية؛ 22 و 27

مارس 1986، موسكو، اتحاد الجمهوريات الاشتراكية السوفياتية.

قائمة المراجع

Abramovici, A., Althouse, W. E., Drever, R. W. P., Gürsel, Y., Kawamura, S., Raab, F. J., Shoemaker, D., Sievers, L., Spero, R. E., Thorne, K. S., Vogt, R. E., Weiss, R., Whitcomb, S. E., and Zucker, M. E. (1992). «LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory,” Science, 256, 325–333.

Aleksandrov, A. D. (1955). «The Space-Time of the Theory of Relativity,” Helvetica Physica Acta, Supplement, 4, 4.

Aleksandrov, A. D. (1959). «The Philosophical Implication and Significance of the Theory of Relativity,” Voprosy Filosofii No. 1, 67.

Alfvén, H., and Herlofson, N. (1950). «Cosmic Radiation and Radio Stars,” Physical Review, 78, 738.

Anderson, W. (1929). «Über die Grenzdichte der Materie und der Energie,” Zeitschrift für Physik 56, 851.

Baade, W. (1952). «Report of the Commission on Extragalactic Nebulae,” Transactions of the International Astronomical Union, 8, 397.

Baade, W., and Minkowski, R. (1954). «Identification of the Radio Sources in Cassiopeia, Cygnus A, and Puppis,” Astrophysical Journal, 119, 206.

Baade, W., and Zwicky, F. (1934a). «Supernovae and Cosmic Rays,” Physical Review, 45, 138.

Baade, W., and Zwicky, F. (1934b). «On Super-Novae,” Proceedings of the National Academy of Sciences, 20, 254.

Bardeen, J. M. (1970). «Kerr Metric Black Holes,” Nature, 226, 64.

Bardeen, J. M., Carter, B., and Hawking, S. W. (1973). «The Four Laws of Black Hole Mechanics,” Communications in Mathematical

Physics, 31, 161.

Bardeen, J. M., and Petterson, J. A. (1975). «The Lense–Thirring Effect and Accretion Disks around Kerr Black Holes,” *Astrophysical Journal (Letters)*, 195, L65.

Begelman, M. C., Blandford, R. D., and Rees, M. J. (1984). «Theory of Extragalactic Radio Sources,” *Reviews of Modern Physics*, 56, 255.

Bekenstein, J. D. (1972). «Black Holes and the Second Law,” *Lettere al Nuovo Cimento*, 4, 737.

Bekenstein, J. D. (1973). «Black Holes and Entropy,” *Physical Review D*, 7, 2333.

Bekenstein, J. D. (1980). «Black Hole Thermodynamics,” *Physics Today*, January 24.

Belinsky, V. A., Khalatnikov, I. M., and Lifshitz, E. M. (1970). «Oscillatory Approach to a Singular Point in the Relativistic Cosmology,” *Advances in Physics*, 19, 525.

Belinsky, V. A., Khalatnikov, I. M., and Lifshitz, E. M. (1982). «Solution of the Einstein Equations with a Time Singularity,” *Advances in Physics*, 31, 639.

Bethe, H. A. (1982). «Comments on the History of the H-Bomb,” *Los Alamos Science*, Fall 1982, 43.

Bethe, H. A. (1990). «Sakharov’s H-Bomb,” *Bulletin of the Atomic Scientists*, October 1990. Reprinted in Drell and Kapitsa (1991), p. 149.

Blair, D., ed. (1991). *The Detection of Gravitational Waves* (Cambridge University Press, Cambridge, England).

Blandford, R. D. (1976). «Accretion Disc Electrodynamics—A Model for Double Radio Sources,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 176, 465.

Blandford, R. D. (1987). «Astrophysical Black Holes,” in *300 Years of Gravitation*, edited by S. W. Hawking and W. Israel (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 277.

Blandford, R. D., and Rees, M. (1974). «A Twin-Exhaust Model

for Double Radio Sources,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 169, 395.

Blandford, R. D., and Znajek, R. L. (1977). «Electromagnetic Extraction of Energy from Kerr Black Holes,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 179, 433.

Bohr, N., and Wheeler, J. A. (1939). «The Mechanism of Nuclear Fission,” *Physical Review*, 56, 426.

Bolton, J. G., Stanley, G. J., and Slee, O. B. (1949). «Positions of Three Discrete Sources of Galactic Radio-Frequency Radiation,” *Nature*, 164, 101.

Boyer, R. H., and Lindquist, R. W. (1967). «Maximal Analytic Extension of the Kerr Metric,” *Journal of Mathematical Physics*, 8, 265.

Braginsky, V. B. (1967). «Classical and Quantum Restrictions on the Detection of Weak Disturbances of a Macroscopic Oscillator,” *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fizik*, 53, 1434. English translation in *Soviet Physics—JETP*, 26, 831 (1968).

Braginsky, V. B. (1977). «The Detection of Gravitational Waves and Quantum Non-disturbative Measurements,” in *Topics in Theoretical and Experimental Gravitation Physics*, edited by V. de Sabbata and J. Weber (Plenum, London), p. 105.

Braginsky, V. B., and Khalili, F. Ya. (1992). *Quantum Measurements* (Cambridge University Press, Cambridge, England).

Braginsky, V. B., Vorontsov, Yu. I., and Khalili, F. Ya. (1978). «Optimal Quantum Measurements in Detectors of Gravitational Radiation,” *Pis'ma v Redaktsiyu Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki* 27, 296. English translation in *JETP Letters*, 27, 276 (1978).

Braginsky, V. B., Vorontsov, Yu. I., and Thorne, K. S. (1980). «Quantum Nondemolition Measurements,” *Science*, 209, 547.

Brault, J. W. (1962). «The Gravitational Redshift in the Solar Spectrum,” unpublished doctoral dissertation, Princeton University; available from University Microfilms, Ann Arbor, Michigan.

Brown, A. C., ed. (1978). *DROPSHOT: The American Plan for World*

War III against Russia in 1957 (Dial Press/James Wade, New York).

Bunting, G. (1983). «Proof of the Uniqueness Conjecture for Black Holes,” unpublished Ph.D. dissertation, Department of Mathematics, University of New England, Armidale, N.S.W. Australia.

Burbidge, G. R. (1959). «The Theoretical Explanation of Radio Emission,” in Paris Symposium on Radio Astronomy, edited by R. N. Bracewell (Stanford University Press, Stanford, California).

Candelas, P. (1980). «Vacuum Polarization in Schwarzschild Spacetime,” *Physical Review D*, 21,2185.

Cannon, R. C., Eggleton, P. P., ytkow, A. N., and Podsiadlowski, P. (1992). «The Structure and Evolution of Thorne— ytkow Objects,” *Astrophysical Journal*, 386, 206-214.

Carter, B. (1966). «Complete Analytic Extension of the Symmetry Axis of Kerr’s Solution of Einstein’s Equations,” *Physical Review*, 141, 1242.

Carter, B. (1968). «Global Structure of the Kerr Family of Gravitational Fields,” *Physical Review*, 174, 1559.

Carter, B. (1979). «The General Theory of the Mechanical, Electromagnetic and Thermodynamic Properties of Black Holes,” in *General Relativity: An Einstein Centenary Survey*, edited by S. W. Hawking and W. Israel (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 294.

Caves, C. M., Thorne, K. S., Drever, R. W. P., Sandberg, V. D., and Zimmermann, M. (1980). «On the Measurement of a Weak Classical Force Coupled to a Quantum-Mechanical Oscillator. I. Issues of Principle,” *Reviews of Modern Physics*, 52,341.

Chandrasekhar, S. (1931). «The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs,” *Astrophysical Journal*, 74, 81.

Chandrasekhar, S. (1935). «The Highly Collapsed Configurations of a Stellar Mass (Second Paper),” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 95, 207.

Chandrasekhar, S. (1983a). *Eddington: The Most Distinguished*

Astrophysicist of His Time (Cambridge University Press, Cambridge, England).

Chandrasekhar, S. (1983b). *The Mathematical Theory of Black Holes* (Oxford University Press, New York).

Chandrasekhar, S. (1989). *Selected Papers of S. Chandrasekhar. Volume I: Stellar Structure and Stellar Atmospheres* (University of Chicago Press, Chicago).

Chandrasekhar, S., and Hartle, J. M. (1982). «On Crossing the Cauchy Horizon of a Reissner-Nordström Black Hole,” *Proceedings of the Royal Society of London*,

A384, 301.

Christodoulou, D. (1970). «Reversible and Irreversible Transformations in Black-Hole Physics,” *Physical Review Letters*, 25, 1596.

Clark, R. W. (1971). *Einstein: The Life and Times* (World Publishing Co., New York).

Cohen, J. M., and Wald, R. M. (1971). «Point Charge in the Vicinity of a Schwarzschild Black Hole,” *Journal of Mathematical Physics*, 12, 1845.

Colgate, S. A., and Johnson, M. H. (1960). «Hydrodynamic Origin of Cosmic Rays,” *Physical Review Letters*, 5, 235.

Colgate, S. A., and White, R. H. (1963). «Dynamics of a Supernova Explosion,” *Bulletin of the American Physical Society*, 8, 306.

Colgate, S. A., and White, R. H. (1966). «The Hydrodynamic Behavior of Supernova Explosions,” *Astrophysical Journal*, 143, 626.

Collins, H. M. (1975). «The Seven Sexes: A Study in the Sociology of a Phenomenon, or the Replication of Experiments in Physics,” *Sociology*, 9, 205

Collins, H. M. (1981). «Son of Seven Sexes: The Social Destruction of a Physical Phenomenon,” *Social Studies of Science* (SAGE, London and Beverly Hills), 11,33.

Damour, T. (1978). «Black-Hole Eddy Currents,” *Physical Review D*, 18, 3598.

Davies, P. C. W. (1975). «Scalar Particle Production in Schwarzschild and Rindler Metrics,” *Journal of Physics A*, 8, 609.

de la Cruz, V., Chase, J. E., and Israel, W. (1970). «Gravitational Collapse with Asymmetries,” *Physical Review Letters*, 24, 423.

de Sabbata, V., and Weber, J., eds. (1977). *Topics in Theoretical and Experimental Gravitation Physics* (Plenum, New York).

DeWitt, C., and DeWitt, B. S., eds. (1964). *Relativity, Groups, and Topology* (Gordon and Breach, New York).

DeWitt, C., and DeWitt, B. S., eds. (1973). *Black Holes* (Gordon and Breach, New York).

Doroshkevich, A. D., and Novikov, I. D. (1978). «Space-Time and Physical Fields in Black Holes,” *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskii Fiziki*, 74, 3. English translation in *Soviet Physics—JETP*, 47, 1 (1978).

Doroshkevich, A. D., Zel’dovich, Ya. B., and Novikov, I. D. (1965). «Gravitational Collapse of Nonsymmetric and Rotating Masses,” *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskii Fiziki*, 49, 170. English translation in *Soviet Physics—JETP*, 22, 122 (1966).

Drell, S., and Kapitsa, S., eds. (1991). *Sakharov Remembered: A Tribute by Friends and Colleagues* (American Institute of Physics, New York).

Drever, R. W. P. (1991). «Fabry–Perot Cavity Gravity-Wave Detectors,” in *The Detection of Gravitational Waves*, edited by D. Blair (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 306.

Dyson, F. J. (1963). «Gravitational Machines,” in *The Search for Extraterrestrial Life*, edited by A. G. W. Cameron (W. A. Benjamin, New York), p. 115.

Echeverria, F., Klinkhammer, G., and Thorne, K. S. (1991). «Billiard Balls in Wormhole Spacetimes with Closed Timelike Curves. I. Classical Theory,” *Physical Review D*, 44, 1077.

ECP-1: Einstein, A. (1987). *The Collected Papers of Albert Einstein. Volume 1: The Early Years, 1879–1902*, edited by John Stachel (Princeton University Press, Princeton, New Jersey). English translation by Anna Beck in a companion volume of the same title.

ECP-2: Einstein, A. (1989). *The Collected Papers of Albert Einstein Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900–1909*, edited by John Stachel (Princeton University Press, Princeton, New Jersey). English translation by Anna Beck in a companion volume of the same title.

Eddington, A. S. (1926). *The Internal Constitution of the Stars* (Cambridge University Press, Cambridge, England).

Eddington, A. S. (1935a). «Relativistic Degeneracy,” *Observatory*, 58, 37.

Eddington, A. S. (1935b). «On Relativistic Degeneracy,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 95, 194.

Einstein, A. (1911). «On the Influence of Gravity on the Propagation of Light,” *Annalen der Physik*, 35, 898.

Einstein, A. (1915). «The Field Equations for Gravitation,” *Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik*, 1915, 844.

Einstein, A. (1939). «On a Stationary System with Spherical Symmetry Consisting of Many Gravitating Masses,” *Annals of Mathematics*, 40, 922.

Einstein, A. (1949). «Autobiographical Notes,” in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, edited by Paul A. Schilpp (Library of Living Philosophers, Evanston, Illinois).

Einstein, A., and Maric, M. (1992). *Albert Einstein/Mileva Maric: The Love Letters*, edited by Jürgen Renn and Robert Schulman (Princeton University Press, Princeton, New Jersey).

Eisenstaedt, J. (1982). «Histoire et Singularités de la Solution de Schwarzschild,” *Archive for History of Exact Sciences*, 27, 157.

Eisenstaedt, J. (1991). «De l’Influence de la Gravitation sur la Propagation de la Lumière en Théorie Newtonienne. L’Archéologie des

Trous Noirs,” *Archive for History of Exact Sciences*, 42, 315.

Epstein, R., and Clark, J. P. A. (1979). «Discussion Session II: Sources of Gravitational Radiation,” in *Sources of Gravitational Radiation*, edited by L. Smarr (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 477.

Feynman, R. P. (1965). *The Character of Physical Law* (British Broadcasting Corporation, London; paperback edition: MIT Press, Cambridge, Massachusetts).

Finkelstein, D. (1958). «Past–Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle,” *Physical Review*, 110, 965.

Finkelstein, D. (1993). «Misner, Kinks, and Black Holes,” in *Directions in General Relativity. Volume 1: Papers in Honor of Charles Misner*, edited by B. L. Hu, M. P. Ryan Jr., and C. V. Vishveshwara (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 99.

Flamm, L. (1916). «Beitrage zur Einsteinschen Gravitationstheorie,” *Physik Zeitschrift*, 17, 448.

Forward, R. L. (1992). *Timemaster*. (Tor Books, New York).

Fowler, R. H. (1926). «On Dense Matter,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 87, 114.

Frank, P. (1947). *Einstein: His Life and Times* (Alfred A. Knopf, New York).

Friedman, H. (1972). «Rocket Astronomy,” *Annals of the New York Academy of Sciences*, 198, 267.

Friedman, J., and Morris, M. S. (1991). «The Cauchy Problem for the Scalar Wave Equation Is Well Defined on a Class of Spacetimes with Closed Timelike Curves,” *Physical Review Letters*, 66, 401.

Friedman, J., Morris, M. S., Novikov, I. D., Echeverria, F., Klinkhammer, G., Thorne, K. S., and Yurtsever, U. (1990). «Cauchy Problem in Spacetimes with Closed Timelike Curves,” *Physical Review D*, 42, 1915.

Friedman, J., Papastamatiou, N., Parker, L., and Zhang, H. (1988). «Non-orientable Foam and an Effective Planck Mass for Point-like Fermions,” *Nuclear Physics*, B309, 533; appendix.

Frolov, V. P. (1991). «Vacuum Polarization in a Locally Static Multiply Connected Spacetime and a Time-Machine Problem,” *Physical Review D*, 43, 3878.

Gamow, G. (1937). *Structure of Atomic Nuclei and Nuclear Transformations* (Clarendon Press, Oxford, England), pp. 234–238.

Gamow, G. (1970). *My World Line* (Viking Press, New York).

Geroch, R. P. (1967). «Topology in General Relativity,” *Journal of Mathematical Physics*, 8, 782.

Gertsenshtein, M. E., and Pustovoit, V. I. (1962). «On the Detection of Low-Frequency Gravitational Waves,” *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fizik*, 43, 605. English translation in *Soviet Physics—JETP*, 16, 433 (1963).

Giacconi, R., and Gursky, H., eds. (1974). *X-Ray Astronomy* (Reidel, Dordrecht, Holland).

Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. R., and Rossi, B. B. (1962). «Evidence for X-Rays from Sources Outside the Solar System,” *Physical Review Letters*, 9, 439.

Gibbons, G. (1979). «The Man Who Invented Black Holes,” *New Scientist*, 28, 1101 (29 June).

Gibbons, G. W., and Hawking, S. W. (1977). «Action Integrals and Partition Functions in Quantum Gravity,” *Physical Review D*, 15, 2752.

Giffard, R. (1976). «Ultimate Sensitivity Limit of a Resonant Gravitational Wave Antenna Using a Linear Motion Detector,” *Physical Review D*, 14, 2478.

Ginzburg, V. L. (1951). «Cosmic Rays as the Source of Galactic Radio Waves,” *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 76, 377.

Ginzburg, V. L. (1964). «The Magnetic Fields of Collapsing Masses and the Nature of Superstars,” *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 156, 43. English translation in *Soviet Physics—Doklady*, 9, 329 (1964).

Ginzburg, V. L. (1984). «Some Remarks on the History of the Development of Radio Astronomy,” in *The Early Years of Radio Astronomy*, edited by W. J. Sullivan (Cambridge University Press,

Cambridge, England).

Ginzburg, V. L. (1990). Private communication to K. S. Thorne.

Ginzburg, V. L., and Ozernoy, L. M. (1964). «On Gravitational Collapse of Magnetic Stars,” *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki*, 47, 1030. English translation in *Soviet Physics—JETP*, 20, 689 (1965).

Gleick, J. (1987). *Chaos: Making a New Science* (Viking/Penguin, New York).

Gödel, K. (1949). «An Example of a New Type of Cosmological Solution of Einstein’s Field Equations of Gravitation,” *Reviews of Modern Physics*, 21, 447.

Golovin, I. N. (1973). L. V. Kurchatov (Atomizdat, Moscow), 2nd edition. An English translation of the earlier and less complete first edition was published as *Academician Igor Kurchatov* (Mir Publishers, Moscow, 1969; also, Selbstver-lag Press, Bloomington, Indiana, 1968).

Goodchild, P. (1980). *J Robert Oppenheimer, Shatterer of Worlds* (British Broadcasting Corporation, London).

Gorelik, G. E. (1991). « ‘My Anti-Soviet Activities...’ One Year in the Life of L. D. Landau,” *Priroda*, November issue, p. 93; in Russian.

Gott, J. R. (1991). «Closed Timelike Curves Produced by Pairs of Moving Cosmic Strings: Exact Solutions,” *Physical Review Letters*, 66, 1126.

Graves, J. C., and Brill, D. R. (1960). «Oscillitory Character of the Reissner-Nordström Metric for an Ideal Charged Wormhole,” *Physical Review*, 120, 1507.

Greenstein, J. L. (1963). «Red-shift of the Unusual Radio Source: 3C48,” *Nature*, 197, 1041.

Greenstein, J. L. (1982). Oral history interview by Rachel Prud’homme, February and March 1982, Archives, California Institute of Technology.

Greenstein, J. L., Oke, J. B., and Shipman, H. (1985). «On the Redshift of Sirius B,” *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 26, 279.

Grishchuk, L. P., Petrov, A. N., and Popova, A. D. (1984). «Exact Theory of the Einstein Gravitational Field in an Arbitrary Background Space-Time,” *Communications in Mathematical Physics*, 94, 379.

Hall, S. S. (1989). «The Man Who Invented Time Travel: The Astounding World of Kip Thorne,” *California*, October, p. 68.

Hanni, R. S., and Ruffini, R. (1973). «Lines of Force of a Point Charge Near a Schwarzschild Black Hole,” *Physical Review D*, 8, 3259.

Harrison, B. K., Thorne, K. S., Wakano, M., and Wheeler, J. A. (1965). *Gravitation Theory and Gravitational Collapse* (University of Chicago Press, Chicago).

Harrison, B. K., Wakano, M., and Wheeler, J. A. (1958). «Matter–Energy at High Density: End Point of Thermonuclear Evolution,” in *La Structure et l’Evolution de l’Univers, Onzième Conseil de Physique Solvay* (Stoops, Brussels), p. 124.

Hartle, J. B., and Sabbadini, A. G. (1977). «The Equation of State and Bounds on the Mass of Nonrotating Neutron Stars,” *Astrophysical Journal*, 213, 831.

Hawking, S. W. (1971a). «Gravitationally Collapsed Objects of Very Low Mass,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 152, 75.

Hawking, S. W. (1971b). «Gravitational Radiation from Colliding Black Holes,” *Physical Review Letters*, 26, 1344.

Hawking, S. W. (1972). «Black Holes in General Relativity,” *Communications in Mathematical Physics*, 25, 152.

Hawking, S. W. (1973). «The Event Horizon,” in *Black Holes*, edited by C. DeWitt and B. S. DeWitt (Gordon and Breach, New York), p. 1.

Hawking, S. W. (1974). «Black Hole Explosions?” *Nature*, 248, 30. Hawking, S. W. (1975). «Particle Creation by Black Holes,” *Communications in Mathematical Physics*, 43, 199.

Hawking, S. W. (1976). «Black Holes and Thermodynamics,” *Physical Review D*, 13, 191.

Hawking, S. W. (1987). «Quantum Cosmology,” in *300 Years*

of Gravitation, edited by S. W. Hawking and W. Israel (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 631.

Hawking, S. W. (1988). *A Brief History of Time* (Bantam Books, Toronto, New York). Hawking, S. W. (1992a). «The Chronology Protection Conjecture,” *Physical Review D*, 46, 603.

Hawking, S. W. (1992b). «Evaporation of Two-Dimensional Black Holes,” *Physical Review Letters*, 69, 406.

Hawking, S. W., and Ellis, G. F. R. (1973). *The Large Scale Structure of Space-Time* (Cambridge University Press, Cambridge, England).

Hawking, S. W., and Hartle, J. B. (1972). «Energy and Angular Momentum Flow into a Black Hole,” *Communications in Mathematical Physics*, 27, 283.

Hawking, S. W., and Penrose, R. (1970). «The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology,” *Proceedings of the Royal Society of London*, A314, 529.

Hey, J. S. (1973). *The Evolution of Radio Astronomy* (Neale Watson Academic Publications, Inc., New York).

Hirsh, R. F. (1979). «Science, Technology, and Public Policy: The Case of X-Ray Astronomy, 1959 to 1972,” unpublished Ph.D. dissertation, University of Wisconsin–Madison; available from University Microfilms, Ann Arbor, Michigan.

Hiscock, W. A., and Konkowski, D. A. (1982). «Quantum Vacuum Energy in Taub–NUT (Newman–Unti–Tamburino)-Type Cosmologies,” *Physical Review D*, 6, 1225.

Hoffman, B. (1972). In collaboration with H. Dukas, *Albert Einstein: Creator and Rebel* (Viking, New York).

Imshennik, V. S., and Nadezhin, D. K. (1964). «Gas Dynamical Model of a Type 11 Supernova Outburst,” *Astronomicheskii Zhurnal* 41, 829. English translation in *Soviet Astronomy—AJ*, 8, 664 (1965).

Israel, W. (1967). «Event Horizons in Static Vacuum Spacetimes,” *Physical Review*, 164, 1776.

Israel, W. (1986). «Third Law of Black Hole Dynamics—A

Formulation and Proof,” *Physical Review Letters*, 57, 397.

Israel, W. (1987). «Dark Stars: The Evolution of an Idea,” in *300 Years of Gravitation*, edited by S. W. Hawking and W. Israel (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 199.

Israel, W. (1990). Letter to K. S. Thorne, dated 28 May 1990, commenting on the semifinal draft of this book.

Jansky, K. (1932). «Directional Studies of Atmospherics at High Frequencies,” *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 20, 1920.

Jennison, R. C., and Das Gupta, M. K. (1953). «Fine Structure of the Extra-terrestrial Radio Source Cygnus 1,” *Nature*, 172, 996.

Kellermann, K., and Sheets, B. (1983). *Serendipitous Discoveries in Radio Astronomy* (National Radio Astronomy Observatory, Green Bank, West Virginia).

Kerr, R. P. (1963). «Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics,” *Physical Review Letters*, 11, 237.

Kevles, D. J. (1971). *The Physicists* (Random House, New York).

Khalatnikov, I. M., ed. (1988). *Vospominaniya o L. D. Landau* (Nauka, Moscow). English translation: *Landau, the Physicist and the Man: Recollections of L. D. Landau* (Pergamon Press, Oxford, England, 1989).

Khalatnikov, I. M., and Lifshitz, E. M. (1970). «The General Cosmological Solution of the Gravitational Equations with a Singularity in Time,” *Physical Review Letters*, 24, 76.

Kiepenheuer, K. O. (1950). «Cosmic Rays as the Source of General Galactic Radio Emission,” *Physical Review*, 79, 738.

Kim, S.-W., and Thorne, K. S. (1991). «Do Vacuum Fluctuations Prevent the Creation of Closed Timelike Curves?” *Physical Review D*, 43, 3939.

Klauder, J. R., ed. (1972). *Magic without Magic: John Archibald Wheeler* (W. H. Freeman, San Francisco).

Kruskal, M. D. (1960). «Minimal Extension of the Schwarzschild Metric,” *Physical Review*, 119, 1743.

Kuhn, T. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions* (University of Chicago Press, Chicago).

Landau, L. D. (1932). «On the Theory of Stars,” *Physikalische Zeitschrift Sowjetunion*, 1, 285.

Landau, L. D. (1938). «Origin of Stellar Energy,” *Nature*, 141, 333.

Landau, L. D., and Lifshitz, E. M. (1962). *Teoriya Polya* (Gosudarstvennoye Izdatel'stvo Fiziko-Matematicheskoi Literaturi, Moscow), Section 108. English translation: *The Classical Theory of Fields* (Pergamon Press, Oxford, England, 1962), Section 110.

Laplace, P. S. (1796). *Exposition du Système du Monde*. Volume II: *Des Mouvements Réels des Corps Célestes* (Paris). Published in English as *The System of the World* (W. Flint, London, 1809).

Laplace, P. S. (1799). «Proof of the Theorem, that the Attractive Force of a Heavenly Body Could Be So Large, that Light Could Not Flow Out of It,” *Allgemeine Geographische Ephemeriden, verfasst von Einer Gesellschaft Gelehrten*. 8vo Weimer, IV, Bd I St. English translation in Appendix A of Hawking and Ellis (1973).

Lifshitz, E. M., and Khalatnikov, I. M. (1960). «On the Singularities of Cosmological Solutions of the Gravitational Equations. I.” *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki* 39, 149. English translation in *Soviet Physics—JETP*, 12, 108 and 558 (1961).

Lifshitz, E. M., and Khalatnikov, I. M. (1963). «Investigations in Relativistic Cosmology,” *Advances in Physics*, 12, 185.

Livanova, A. (1980). *Landau: A Great Physicist and Teacher* (Pergamon Press, Oxford, England).

Longair, M. S., Ryle, M., and Scheuer, P. A. G. (1973). «Models of Extended Radio Sources,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 164, 243.

Lorentz, H. A., Einstein, A., Minkowski, H., and Weyl, H. (1923). *The Principle of Relativity: A Collection of Original Memoirs on the*

Special and General Theory of Relativity (Dover, New York).

Lynden-Bell, D. (1969). «Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars,” *Nature*, 223, 690.

Lynden-Bell, D. (1978). «Gravity Power,” *Physica Scripta*, 17, 185.

Mazur, P. (1982). «Proof of Uniqueness of the Kerr–Newman Black Hole Solution,” *Journal of Physics A*, 15, 3173.

May, M. M., and White, R. H. (1965). «Hydrodynamical Calculation of General Relativistic Collapse,” *Bulletin of the American Physical Society*, 10, 15.

May, M. M., and White, R. H. (1966). «Hydrodynamic Calculations of General Relativistic Collapse,” *Physical Review*, 141, 1232.

Medvedev, Z. A. (1978). *Soviet Science* (W. W. Norton, New York).

Medvedev, Z. A. (1979). *Nuclear Disaster in the Urals* (W. W. Norton, New York).

Michell, J. (1784). «On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, Etc., of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of Their Light, in Case Such a Diminution Should Be Found to Take Place in Any of Them, and Such Other Data Should Be Procured from Observations, as Would Be Further Necessary for That Purpose,” in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 74, 35; presented to the Royal Society on 27 November 1783.

Michelson, P. F., and Taber, R. C. (1984). «Can a Resonant-Mass Gravitational-Wave Detector Have Wideband Sensitivity?” *Physical Review D*, 29, 2149.

Misner, C. W. (1969). «Mixmaster Universe,” *Physical Review Letters*, 22, 1071.

Misner, C. W., Thorne, K. S., and Wheeler, J. A. (1973). *Gravitation* (W. H. Freeman, San Francisco).

Mitton, S., and Ryle, M. (1969). «High Resolution Observations of Cygnus A at 2.7 GHz and 5 GHz,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 146, 221.

Morris, M. S., and Thorne, K. S. (1988). «Wormholes in Spacetime and Their Use for Interstellar Travel: A Tool for Teaching General Relativity,” *American Journal of Physics*, 56, 395.

Morris, M. S., Thorne, K. S., and Yurtsever, U. (1988). «Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition,” *Physical Review Letters*, 61, 1446.

Moss, G. E., Miller, L. R., and Forward, R. L. (1971). «Photon Noise Limited Laser Transducer for Gravitational Antenna,” *Applied Optics*, 10, 2495.

MTW: Misner, Thorne, and Wheeler (1973).

Newman, E. T., Couch, E., Chinnapared, K., Exton, A., Prakash, A., and Torrence, R. (1965). «Metric of a Rotating, Charged Mass,” *Journal of Mathematical Physics*, 6, 918.

Novikov, I. D. (1963). «The Evolution of the Semi-Closed World,” *Astronomicheskii Zhurnal*, 40, 772. English translation in *Soviet Astronomy—AJ*, 7, 587 (1964).

Novikov, I. D. (1966). «Change of Relativistic Collapse into Anticollapse and Kinematics of a Charged Sphere,” *Pis'ma v Redaktsiyu Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki*, 3, 223. English translation in *JETP Letters*, 3, 142 (1966).

Novikov, I. D. (1969). «Metric Perturbations When Crossing the Schwarzschild Sphere,” *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki*, 57, 949. English translation in *Soviet Physics—JETP*, 30, 518 (1970).

Novikov, I. D., Polnarev, A. G., Starobinsky, A. A., and Zel'dovich, Ya. B. (1979). «Primordial Black Holes,” *Astronomy and Astrophysics*, 80, 104.

Novikov, I. D., and Zel'dovich, Ya. B. (1966). «Physics of Relativistic Collapse,” *Supplemento al Nuovo Cimento*, 4, 810; Addendum 2.

Oppenheimer, J. R., and Serber, R. (1938). «On the Stability of Stellar Neutron Cores,” *Physical Review*, 54, 608.

Oppenheimer, J. R., and Snyder, H. (1939). «On Continued

Gravitational Contraction,” *Physical Review*, 56, 455.

Oppenheimer, J. R., and Volkoff, G. (1939). «On Massive Neutron Cores,” *Physical Review*, 54, 540.

Ori, A. (1991). «The Inner Structure of a Charged Black Hole: An Exact Mass Inflation Solution,” *Physical Review Letters*, 67, 789.

Ori, A. (1992). «Structure of the Singularity Inside a Realistic Rotating Black Hole,” *Physical Review Letters*, 68, 2117.

Page, D. N. (1976). «Particle Emission Rates from a Black Hole,” *Physical Review D*, 13, 198, and 14, 3260.

Page, D. N., and Hawking, S. W. (1975). «Gamma Rays from Primordial Black Holes,” *Astrophysical Journal* 206, 1.

Pagels, H. (1982). *The Cosmic Code* (Simon and Schuster, New York).

Pais, A. (1982). «Subtle Is the Lord...” *The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford University Press, Oxford, England).

Penrose, R. (1965). «Gravitational Collapse and Spacetime Singularities,” *Physical Review Letters*, 14, 57.

Penrose, R. (1968). «The Structure of Spacetime,” in *Battelle Rencontres: 1967 Lectures in Mathematics and Physics*, edited by C. M. DeWitt and J. A. Wheeler (Benjamin, New York), p. 565.

Penrose, R. (1969). «Gravitational Collapse: The Role of General Relativity,” *Rivista Nuovo Cimento*, 1, 252.

Penrose, R. (1989). *The Emperor’s New Mind* (Oxford University Press, New York), pp. 419-421.

Phinney, E. S. (1989). «Manifestations of a Massive Black Hole in the Galactic Center,” in *The Center of the Galaxy: Proceedings of IAU Symposium 136*, edited by M. Morris (Reidel, Dordrecht, Holland), p. 543.

Pimenov, R. I. (1968). *Prostranstva Kinimaticeskovo Tipa* [Seminars in Mathematics], Vol. 6 (V. A. Steklov Mathematical Institute, Leningrad). English translation: *Kinematic Spaces* (Consultants Bureau,

New York, 1970).

Podurets, M. A. (1964). «The Collapse of a Star with Back Pressure Taken Into Account,” *Doklady Akademii Nauk*, 154, 300. English translation in *Soviet Physics—Doklady*, 9, 1 (1964).

Poisson, E., and Israel, W. (1990). «Internal Structure of Black Holes,” *Physical Review D*, 41, 1796.

Press, W. H. (1971). «Long Wave Trains of Gravitational Waves from a Vibrating Black Hole,” *Astrophysical Journal Letters*, 170, 105.

Press, W. H., and Teukolsky, S. A. (1973). «Perturbations of a Rotating Black Hole. II. Dynamical Stability of the Kerr Metric,” *Astrophysical Journal* 185, 649.

Price, R. H. (1972). «Nonspherical Perturbations of Relativistic Gravitational Collapse,” *Physical Review D*, 5, 2419 and 2439.

Price, R. H., and Thorne, K. S. (1988). «The Membrane Paradigm for Black Holes,” *Scientific American*, 258 (No. 4), 69.

Rabi, I. I., Serber, R., Weisskopf, V. F., Pais, A., and Seaborg, G. T. (1969). *Oppenheimer* (Scribners, New York).

Reber, G. (1940). «Cosmic Static,” *Astrophysical Journal*, 91, 621.

Reber, G. (1944). «Cosmic Static,” *Astrophysical Journal*, 100, 279.

Reber, G. (1958). «Early Radio Astronomy at Wheaton, Illinois,” *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 46, 15.

Rees, M. (1971). «New Interpretation of Extragalactic Radio Sources,” *Nature*, 229, 312 and 510.

Renn, J., and Schulman, R. (1992). *Introduction to Albert Einstein/Mileva Maric: The Love Letters*, edited by Jürgen Renn and Robert Schulman (Princeton University Press, Princeton, New Jersey).

Rhodes, R. (1986). *The Making of the Atomic Bomb* (Simon and Schuster, New York).

Ritus V. I. (1990). «If Not I, Then Who?” *Priroda*, August issue. English translation in Drell and Kapitsa, eds. (1991).

Robinson, I., Schild, A., and Schucking, E. L., eds. (1965). *Quasi-*

Stellar Sources and Gravitational Collapse (University of Chicago Press, Chicago).

Romanov, Yu. A. (1990). «The Father of the Soviet Hydrogen Bomb,” *Priroda*, August issue. English translation in Drell and Kapitsa, eds. (1991).

Royal, D. (1969). *The Story of J. Robert Oppenheimer* (St. Martin's Press, New York).

Sagan, C. (1985). *Contact* (Simon and Schuster, New York).

Sakharov, A. (1990). *Memoirs* (Alfred A. Knopf, New York).

Salpeter, E. E. (1964). «Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects,” *Astrophysical Journal* 140, 796.

Schaffer, S. (1979). «John Michell and Black Holes,” *Journal for the History of Astronomy*, 10, 42.

Schmidt, M. (1963). «3C273: A Star-like Object with Large Redshift,” *Nature*, 197, 1040.

Schwarzschild, K. (1916a). «Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie,” *Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik*, 1916, 189.

Schwarzschild, K. (1916b). «Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie,” *Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik*, 1916, 424.

Seelig, C. (1956). *Albert Einstein: A Documentary Biography* (Staples Press, London), p. 104.

Serber, R. (1969). «The Early Years,” in Rabi et al. (1969); also published in *Physics Today*, October 1967, p. 35.

Shapiro, S. L., and Teukolsky, S. A. (1983). *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars* (Wiley, New York).

Shapiro, S. L., and Teukolsky, S. A. (1991). «Formation of Naked Singularities—The Violation of Cosmic Censorship,” *Physical Review*

Letters, 66, 994.

Smart, W. M. (1953). *Celestial Mechanics* (Longmans, Green and Co., London), Section 19.03.

Smith, A. K., and Weiner, C. (1980). *Robert Oppenheimer: Letters and Recollections* (Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts).

Smith, H. J. (1965). «Light Variations of 3C273,” in *Quasi-Stellar Sources and Gravitational Collapse*, edited by I. Robinson, A. Schild, and E. L. Schucking (University of Chicago Press, Chicago), p. 221.

Solvay (1958). *Onzieme Conseil de Physique Solvay, La Structure et l'Evolution de l'Univers* (Editions R. Stoops, Brussels).

Stoner, E. C. (1930). «The Equilibrium of Dense Stars,” *Philosophical Magazine*, 9, 944.

Strove, O., and Zebergs, V. (1962). *Astronomy of the 20th Century* (Macmillan, New York).

Sullivan, W. J., ed. (1982). *Classics in Radio Astronomy* (Reidel, Dordrecht, Holland).

Sullivan, W. J., ed. (1984). *The Early Years of Radio Astronomy* (Cambridge University Press, Cambridge, England).

Sunyaev, R. A. (1972). «Variability of X Rays from Black Holes with Accretion Disks,” *Astronomicheskii Zhurnal* 49, 1153. English translation in *Soviet Astronomy—AJ*, 16, 941 (1973).

Taylor, E. F., and Wheeler, J. A. (1992). *Spacetime Physics: Introduction to Special Relativity* (W. H. Freeman, San Francisco).

Teller, E. (1955). «The Work of Many People,” *Science*, 121, 268.

Teukolsky, S. A. (1972). «Rotating Black Holes: Separable Wave Equations for Gravitational and Electromagnetic Perturbations,” *Physical Review Letters*, 29, 1115.

Thorne, K. S. (1967). «Gravitational Collapse,” *Scientific American*, 217 (No. 5), 96.

Thorne, K. S. (1972). «Nonspherical Gravitational Collapse—A Short Review,” in *Magic without Magic: John Archibald Wheeler*, edited by J.

R. Klauder (W. H. Freeman, San Francisco), p. 231.

Thorne, K. S. (1974). «The Search for Black Holes,” *Scientific American*, 231 (No. 6), 32.

Thorne, K. S. (1987). «Gravitational Radiation,” in *300 Years of Gravitation*, edited by S. W. Hawking and W. Israel (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 330.

Thorne, K. S. (1991). «An American’s Glimpses of Sakharov,” *Priroda*, May issue; in Russian. English translation in Drell and Kapitsa, eds. (1991), p. 74.

Thorne, K. S. (1993). «Closed Timelike Curves,” in *General Relativity and Gravitation 1992*, edited by R. J. Gleiser, C. N. Kozameh, and D. M. Moreschi (Institute of Physics Publishing, Bristol, England), p. 295.

Thorne, K. S., Drever, R. W. P., Caves, C. M., Zimmermann, M., and Sandberg, V. D. (1978). «Quantum Nondemolition Measurements of Harmonic Oscillators,” *Physical Review Letters*, 40, 667.

Thorne, K. S., Price, R. H., and Macdonald, D. A., eds. (1986). *Black Holes: The Membrane Paradigm* (Yale University Press, New Haven, Connecticut).

Thorne, K. S., and Zurek, W. (1986). «John Archibald Wheeler: A Few Highlights of His Contributions to Physics,” *Foundations of Physics*, 16, 79.

Thorne, K. S., and Zytkow, A. N. (1977). «Stars with Degenerate Neutron Cores. I. Structure of Equilibrium Models,” *Astrophysical Journal*, 212, 832.

Tipler, F. J. (1976). «Causality Violation in Asymptotically Flat Space-Times,” *Physical Review Letters*, 37, 879.

Tolman, R. C. (1939). «Static Solutions of Einstein’s Field Equations for Spheres of Fluid,” *Physical Review*, 55, 364.

Tolman, R. C. (1948). The Richard Chace Tolman Papers, archived in the California Institute of Technology Archives.

Trimble, V. L., and Thorne, K. S. (1969). «Spectroscopic Binaries and Collapsed Stars,” *Astrophysical Journal*, 56, 1013.

Uhuru (1981). «Proceedings of the Uhuru Memorial Symposium: The Past, Present, and Future of X-Ray Astronomy,” *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 71 (No. 1).

Unruh, W. G. (1976). «Notes on Black-Hole Evaporation,” *Physical Review D*, 14, 870.

Unruh, W. G., and Wald, R. M. (1982). «Acceleration Radiation and the Generalized Second Law of Thermodynamics,” *Physical Review D*, 25, 942.

Unruh, W. G., and Wald, R. M. (1984). «What Happens When an Accelerating Observer Detects a Rindler Particle,” *Physical Review D*, 29, 1047.

USAEC [United States Atomic Energy Commission] (1954). In the Matter of J. Robert Oppenheimer; Transcript of Hearing before Personnel Security Board, Washington, D.C., April 12, 1954, through May 6, 1954 (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C)..

van Stockum, W. J. (1937). «The Gravitational Field of a Distribution of Particles Rotating about an Axis of Symmetry,” *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 57, 135.

Wald, R. M. (1977). «The Back Reaction Effect in Particle Creation in Curved Space-time,” *Communications in Mathematical Physics*, 54, 1.

Wald, R. M., and Yurtsever, U. (1991). «General Proof of the Averaged Null Energy Condition for a Massless Scalar Field in Two-Dimensional Curved Space-time,” *Physical Review D*, 44, 403.

Wali, K. C. (1991). *Chandra: A Biography of S. Chandrasekhar* (University of Chicago Press, Chicago).

Washington (1954). «Washington Conference on Radio Astronomy—1954,” *Journal of Geophysical Research*, 59, 1–204.

Weber, J. (1953). «Amplification of Microwave Radiation by Substances Not in Thermal Equilibrium,” *Transactions of the IEEE, PG Electron Devices*—3, 1 (June).

Weber, J. (1960). «Detection and Generation of Gravitational Waves,”

Physical Review, 117, 306.

Weber, J. (1961). *General Relativity and Gravitational Waves* (Wiley–Interscience, New York).

Weber, J. (1964). Unpublished research notebooks; also documented in Robert Forward's unpublished Personal Journal No. C1338, page 66, 13 September 1964.

Weber, J. (1969). «Evidence for Discovery of Gravitational Radiation,” *Physical Review Letters*, 22, 1320.

Weiss, R. (1972). «Electromagnetically Coupled Broadband Gravitational Antenna,” *Quarterly Progress Report of the Research Laboratory of Electronics, M.I.T.*, 105, 54.

Wheeler, J. A. (1955). «Geons,” *Physical Review*, 97, 511. Reprinted in Wheeler (1962), p. 131.

Wheeler, J. A. (1957). «On the Nature of Quantum Geometrodynamics,” *Annals of Physics*, 2, 604.

Wheeler, J. A. (1960). «Neutrinos, Gravitation and Geometry,” in *Proceedings of the International School of Physics, «Enrico Fermi,” Course XI* (Zanichelli, Bologna). Reprinted in Wheeler (1962), p. 1.

Wheeler, J. A. (1962). *Geometrodynamics* (Academic Press, New York).

Wheeler, J. A. (1964a). «The Superdense Star and the Critical Nucleon Number,” in *Gravitation and Relativity*, edited by H. Y. Chiu and W. F. Hoffman (Benjamin, New York), p. 10.

Wheeler, J. A. (1964b). «Geometrodynamics and the Issue of the Final State,” in *Relativity, Groups, and Topology*, edited by C. DeWitt and B. S. DeWitt (Gordon and Breach, New York), p. 315.

Wheeler, J. A. (1968). «Our Universe: The Known and the Unknown,” *American Scientist*, 56, 1.

Wheeler, J. A. (1979). «Some Men and Moments in the History of Nuclear Physics: The Interplay of Colleagues and Motivations,” in *Nuclear Physics in Retrospect*, edited by Roger H. Stuewer (University of Minnesota, Minneapolis).

Wheeler, J. A. (1985). Letter to K. S. Thorne dated 3 December.

Wheeler, J. A. (1988). Notebooks in which Wheeler recorded his research work and ideas as they developed; now archived at the American Philosophical Society Library, Philadelphia, Pennsylvania.

Wheeler, J. A. (1990). *A Journey into Gravity and Spacetime* (Scientific American Library, New York).

Whipple, F. L., and Greenstein, J. L. (1937). «On the Origin of Interstellar Radio Disturbances,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 23, 177.

White, T. H. (1939). *The Once and Future King* (Collins, London), Chapter 13 of Part I, «The Sword in the Stone.”

Will, C. M. (1986). *Was Einstein Right?* (Basic Books, New York).

York, H. (1976). *The Advisors: Oppenheimer, Teller and the Superbomb* (W. H. Freeman, San Francisco).

Zel'dovich, Ya. B. (1962). «Semi-closed Worlds in the General Theory of Relativity,” *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki* 43, 1037. English translation in *Soviet Physics—JETP*, 16, 732 (1963).

Zel'dovich, Ya. B. (1964). «The Fate of a Star and the Evolution of Gravitational Energy upon Accretion,” *Doklady Akademii Nauk*, 155, 67. English translation in *Soviet Physics—Doklady*, 9, 195 (1964).

Zel'dovich, Ya. B. (1971). «The Generation of Waves by a Rotating Body,” *Pis'ma v Redaktsiyu Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki*, 14, 270. English translation in *JETP Letters*, 14, 180 (1971).

Zel'dovich, Ya. B. (1985). *Collected Works: Particles, Nuclei, and the Universe* (Nauka, Moscow); in Russian. English translation: *Selected Works of Yakov Borisovich Zel'dovich Volume II: Particles, Nuclei, and the Universe* (Princeton University Press, Princeton, 1993).

Zel'dovich, Ya. B., and Guseinov, O. Kh. (1965). «Collapsed Stars in Binaries,” *Astrophysical Journal*, 144, 840.

Zel'dovich, Ya. B., and Khariton, Yu. B. (1939). «On the Issue of a Chain Reaction Based on an Isotope of Uranium,” *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki*, 9, 1425; see also the follow-up papers by the same

authors in the same journal, 10, 29 (1940) and 10, 477 (1940). Reprinted as the first three papers in Volume II of Zel'dovich's collected works, Zel'dovich (1985).

Zel'dovich, Ya. B., and Novikov, I. D. (1964). «Relativistic Astrophysics, Part I,” Uspekhi Fizicheskikh Nauk, 84, 877. English translation in Soviet Physics—Uspekhi, 7, 763 (1965).

Zel'dovich, Ya. B., and Novikov, I. D. (1965). «Relativistic Astrophysics, Part II,” Uspekhi Fizicheskikh Nauk, 86, 447. English translation in Soviet Physics—Uspekhi, 8, 522 (1966).

Zel'dovich, Ya. B., and Starobinsky, A. A. (1971). «Particle Production and Vacuum Polarization in an Anisotropic Gravitational Field,” Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki, 61, 2161. English translation in Soviet Physics—JETP, 34, 1159 (1972).

Znajek, R. (1978). «The Electric and Magnetic Conductivity of a Kerr Hole,” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 185, 833.

Zwicky, F. (1935). «Stellar Guests,” Scientific Monthly, 40, 461.

Zwicky, F. (1939). «On the Theory and Observation of Highly Collapsed Stars,” Physical Review, 55, 726.

کتبه
t.me/soramnqraa

إنه كتاب ممتع بعمق،

كمزيج مثير بين تاريخ النظرية والحكاية ..

وول ستريت جورنال

يحتل هذا الكتاب مكانة مرموقة بين أهم كتب الفيزياء الفلكية -إن لم يكن أهمها على الإطلاق- وبخاصة تلك التي تهتم بالثقوب السوداء.

ازدادت أهمية هذا الكتاب في السنوات الأخيرة بسبب عدد من الأحداث العلمية المهمة، فقد صدقت معظم نبوءاته فيما يخص علوم الفلك، وبخاصة في مسألة الثقوب السوداء.

لقد تمكن كيب ثورن (مؤلف الكتاب) بالإضافة إلى شركائه الباحثين من رصد موجات الجاذبية للمرة الأولى في التاريخ العلمي، وهو الأمر الذي اعتُبر سبقاً علمياً عظيماً.

ثم لاحقاً في عام 2019 تمكن العلماء عن طريق تقنية هندسية متقدمة من التقاط صورة أفق ثقب أسود للمرة الأولى في التاريخ.

وهكذا توجت هذه الأحداث وما صاحبها جهداً كبيراً لعلماء الفيزياء الفلكية في فهم ودراسة النسبية العامة وتنبؤاتها، مثل موجات الجاذبية والثقوب السوداء

وكيب ثورن هو أحد أبرز علماء الفيزياء النظرية، ولديه تاريخ أكاديمي وعلمي حافل، عُرف بصداقته وزمالاته لستيفن هوكينج وكارل ساجان؛ حصل على درجة الدكتوراه من جامعة برينستون في عام 1965، وعمل أستاذاً في عدد من أعرق الجامعات العالمية، قبل أن يصبح أستاذاً لكرسي ريتشارد فاينمان للفيزياء النظرية في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا (كالتيك) حتى عام 2009.

حصل على عشرات الجوائز العلمية، توجَّهًا بحصوله على جائزة نوبل في الفيزياء رفقة راينر فايس وباري باريش عام 2017، «لمساهماتهم الحاسمة في مرصد LIGO ومن ثم رصد موجات الجاذبية».

مكتبة

t.me/soramnqraa

